

传承焊接基础的经典著作
典藏焊接图书的必备书目

焊接科学基础

—— 焊接方法与过程控制基础 ——



中国机械工程学会焊接学会 编

黄石生 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



焊 接 科 学 基 础

——焊接方法与过程控制基础

中国机械工程学会焊接学会 编

主 编 黄石生

副主编 赵熹华 薛家祥 华学明



机 械 工 业 出 版 社

本书是由中国机械工程学会焊接学会组织编写的“焊接科学基础”之一。

全书由 5 篇 28 章组成。在介绍焊接方法及其过程控制基本概念的基础上,介绍了焊接方法的分类及其特点,论述了电弧焊、压焊、钎焊、高能束焊和其他焊接方法的原理、工艺及设备,同时介绍了焊接过程的自动控制技术、检测与伺服系统、信息处理与质量控制、焊接自动化专用设备和机器人,进而对焊接方法与过程控制的正确选择提出了基本要求,并合理地融入了焊接技术的发展现状与趋势。

本书充分体现了经典、成熟、基本、传承的指导思想,基本概念、基本方法、基本理论成熟、可靠,描述准确、清楚,充分反映了焊接方法与过程控制的核心内容。同时,与现代的科研成果、创新技术相结合,反映了先进性和趋势性的研究成果。

本书可供从事焊接技术工作的科研和工程技术人员阅读,也可作为高等院校焊接专业本科生和研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

焊接方法与过程控制基础/黄石生主编;中国机械工程学会焊接学会编. —北京:机械工业出版社,2013.8

(焊接科学基础)

ISBN 978-7-111-46212-5

I. ①焊… II. ①黄…②中… III. ①焊接工艺②焊接-过程控制
IV. ①TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 054954 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:何月秋

责任编辑:何月秋 版式设计:霍永明

责任校对:张晓蓉 申春香 封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·54.5 印张·2 插页·1546 千字

0001—2000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-46212-5

定价:178.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

策划编辑电话:(010) 88379732

编委会名单

(排名不分先后)

主 任	吴毅雄				
副主任	王麟书	陈丙森	黄石生	杜则裕	陈清阳
顾 问	单 平	陈 强	张彦敏	冯吉才	何 实
	薛振奎	田志凌	李宪政		
委 员	赵熹华	薛家祥	华学明	李亚江	邹增大
	陆 皓	赵海燕	吴志生	张友寿	蔡 艳
	王文先	张彦华	王成文	康 龙	潘春旭
	朱 胜	刘振英	何月秋	吕德齐	
秘 书	黄彩艳				

序

从与人们生活密切相关的日用品、电子产品到摩托车、汽车、轮船、高铁等交通工具，从建筑钢结构到锅炉、石油、化工、天然气领域，从核电站到航空、航天，哪一个领域都离不开焊接；焊接在国民经济中发挥着越来越大的作用。

作为全国性的专业学术组织，中国机械工程学会焊接学会（以下简称焊接学会）对我国焊接事业的发展和传承，尤其是拓展专业知识、传播科学理论、推动技术进步、培养一流人才等方面有责任和义务做出贡献。

目前我国正处在由焊接大国向焊接强国迈进的时代，焊接科学与工程技术随着以数字技术为特征的时代发展而日益显现其宽广的发展和创新空间。焊接基础乃是广大焊接工作者赖以做出贡献的基本。

鉴于高校教学的宽口径改革，大部分高校传统的焊接专业并入材料加工成形及控制专业，过去由国家有关部门承担的焊接教科书编写与出版工作已经停止等现实，焊接学会编辑出版委员会决定组织国内焊接领域相关学科的专家学者编辑出版一套“焊接科学基础”图书，以满足焊接学科进步和行业发展的实际需求。为此我们力求这套图书能够成为代表当前业界较高水平的精品著作，使之成为焊接学会的“看家书”。同时也希望今后经过一代代焊接人的不断补充、不断完善，使之成为我国焊接界的传承经典之作。

历时4年，经过焊接学会编辑出版委员会的努力，在广大焊接专家、学者的积极参与和大力支持下，“焊接科学基础”图书终于面世了。其宽广的知识范围和先进的技术内容，系统地反映了焊接学科和专业的理论基础，也体现了焊接科技的进步与积累；既可以作为高等学校教师和学生的教学书籍，还可成为从事焊接工作的广大科技人员的参考书。相信该套图书的出版必将对我国焊接事业的传承和发展起到重要的推动作用。

该套图书的编写出版得到了国内许多高等院校、科研院所及企事业单位的大力支持和积极参与，来自清华大学、上海交通大学、天津大学、华南理工大学、山东大学、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、吉林大学、北京工业大学、兰州理工大学、太原科技大学、装甲兵工程学院、沈阳工业大学、太原理工大学、中国石油大学、中国铁道科学研究院金属及化学研究所、北京材料及工艺研究所、哈尔滨焊接研究所、太原重工股份有限公司、北京嘉克新兴科技有限公司等单位的近百名教授、专家、学者参与了该套图书的编写和审校工作。在此焊接学会向各参与单位的大力支持和全体编审者的辛勤付出表示衷心的感谢！

焊接学会编辑出版委员会主任吴毅雄教授和主编黄石生教授、陈丙森教授、杜则裕教授、陈清阳教授级高工，以及编委会的各位成员、各位编审者都为该套图书的编纂耗费了大量的心血和精力，为此特表最诚挚的谢意！

犹如长期以来对焊接学会编辑出版工作的支持，从该套图书的策划到出版均得到了

机械工业出版社领导和编辑人员的大力协助，在此对他们的付出表示深深的感谢！

该套图书的内容多、涉及范围广，参与编纂人员的队伍庞大，编写过程中难免出现疏漏，敬请广大读者批评指正，以便我们更好地为焊接界服务！

中国机械工程学会
焊接学会理事长

A large, stylized handwritten signature in black ink, consisting of two characters: '陈' (Chen) and '守' (Shou), which together read '陈守' (Chen Shou).

前 言

本书是由中国机械工程学会焊接学会组织编写的“焊接科学基础”之一。本书定位于从事焊接技术工作的科研和工程技术人员，以及高等院校焊接专业师生，给他们提供焊接领域经典的、成熟的、基本的概念、理论和方法，以指导他们运用这些基本知识进行科研、教学和生产。

本书在编写时充分体现了“经典、成熟、基本、传承”的指导思想，基本概念、基本方法、基本理论成熟、可靠，描述准确、清楚，充分反映了焊接方法与过程控制的核心内容。同时，又与现代的科研成果、创新技术相结合，以便在具体的章节中充分体现先进性、趋势性的发展研究成果。

本书在介绍焊接方法与过程控制基本概念的基础上，介绍了焊接方法的分类及其特点，论述了电弧焊、压焊、高能束焊、钎焊和其他焊接方法的原理、工艺及设备，同时介绍了焊接过程的自动控制技术、检测与伺服系统、信息处理与质量控制、焊接自动化专用设备和机器人，进而对焊接方法的选择提出了基本要求，简述了焊接技术的发展。

本书编审人员及其分工如下。

主编：黄石生（负责编写提纲的制订、第1篇的统稿和全书的统稿、定稿）。

副主编：赵熹华（负责第2篇的统稿和全书的审稿），薛家祥（协助第4篇统稿），华学明（协助第5篇统稿）。

前言、焊接方法概述、第1章和第2章编者、第1篇统稿黄石生；审者赵熹华。第3章编者陈毅刚；审者胡盛跃。第4章编者胡盛跃（编写4.1至4.6节和统稿）、周清清（编写4.7节）；审者周业基。第5章编者薛峰（编写5.1至5.6节和统稿）、吴开源（编写5.7节）；审者周业基。第6章编者温立民（编写6.1至6.3节和统稿）、石永华（编写6.4和6.5节）；审者胡盛跃。第7章编者王振民；审者温瑾林。第8章编者石永华（编写8.1节、8.2节和统稿）、蒋晓明（编写8.3和8.4节）；审者李尚周。

第2篇统稿：赵熹华。第1章编者赵熹华；审者冯吉才。第2章编者赵贺、赵熹华；审者冯吉才。第3章、第4章编者冯吉才；审者赵熹华。第5章编者赵贺、冯吉才；审者赵熹华。

第3篇统稿：卫国强。第1章、第4章编者卫国强；审者庄鸿寿。第2章编者石永华；审者卫国强。第3章编者黄延禄；审者卫国强。

第4篇统稿：华学明。第1章编者黄坚；审者李铸国。第2章编者姚瞬；审者唐新华。第3章编者徐国祥；审者姚瞬。第4章编者华学明；审者姚瞬。第5章编者李力；审者楼松年。第6章编者李宏运；审者吴毅雄。

第5篇统稿：薛家祥。第1章至第3章编者薛家祥；审者吴林、张广军。第4章、

第5章编者张广军；审者吴林。

本书在编写过程中得到了焊接学会编辑出版工作委员会和机械工业出版社的指导及有关院校师生、企业工程专家等的大力支持，在此谨致谢意。

鉴于编者水平有限，书中难免会有不足之处，敬请专家、学者和读者批评指正。

编者

符 号 说 明

符号	名 称	符号	名 称
U_0	空载电压有效值(或平均值)	I_y	电源电流有效值
$U_y(U)$	电源电压有效值(或平均值)	I_m	脉冲电流峰值
U_{yh}	引弧电压	I_j	基本电流
U_f, u_f	电弧电压有效值(或平均值)和瞬时值	I_{fh}	反馈电流
U_A	交流绕组电压有效值	$R_f(R_h)$	电弧电阻
U_C	控制电压平均值	$I_{\omega d}$	稳态短路电流
I_f, i_f	电弧电流有效值(或平均值)和瞬时值电流	I_{sd}	空载至短路瞬时短路电流峰值
Φ	磁通	I'_{sd}	经 0.05s 后的瞬时短路
R	电阻(器)	I_{fd}	负载至短路瞬间短路电流峰值
L	电感(器)、电抗器	RS	分流器
C	电容(器)	S、Q	开关
LB	平衡电抗(器)	SB	按钮
RP	电位器	SC	转换开关
G	发电机	FU	熔断器
MF	风扇电动机	K	继电器
W	电机、变压器绕组	KM	接触器
N	绕组匝数、运算放大器	UR	整流器
WC	控制绕组	H	指示灯
AM	磁放大器	VD	二极管
T	变压器	V	晶体管
TI	脉冲变压器	VS	稳压管
SV	稳压器	VU	单结晶体管
TV	电压互感器	VH	晶闸管
TA	电流互感器,自耦变压器	VC	程控单结晶体管
YV	电磁阀	VF	场效应晶体管(MOSFET)
X	接线座	VT	绝缘栅双极型晶体管(IGBT)
G	给定电路	A	放大器
M	检测器	AT	触发器
I_0	空载电流	DA、DAN	与门、与非门

目 录

序	0.1 焊接方法分类	1
前言	0.2 焊接方法简介	4
符号说明	0.3 焊接方法的选择	7
绪论 焊接方法概述	0.4 焊接技术的新发展	10
1		

第1篇 弧焊基础

第1章 焊接电弧及其对弧焊电源的要求	14
1.1 焊接电弧的物理本质、引燃及分类	14
1.1.1 焊接电弧的物理本质	14
1.1.2 焊接电弧的引燃	14
1.1.3 焊接电弧的分类及其应用	14
1.2 直流焊接电弧的结构和电特性	15
1.2.1 焊接电弧的结构及其压降分布	15
1.2.2 焊接电弧的电特性	15
1.2.3 焊接电弧力	16
1.3 交流焊接电弧的特点及其电特性	18
1.4 其他类型焊接电弧	20
1.4.1 脉冲焊接电弧	20
1.4.2 自由焊接电弧	21
1.4.3 压缩焊接电弧	21
1.5 弧焊工艺对弧焊电源外特性的要求	22
1.5.1 “电源-电弧”系统的稳定性	22
1.5.2 对外特性曲线形状的要求	23
1.6 弧焊工艺对弧焊电源调节性能的要求	25
1.6.1 弧焊电源的调节性能	25
1.6.2 弧焊电源的可调焊接参数	26
1.6.3 弧焊电源的负载持续率和额定参数	27
1.7 弧焊工艺对弧焊电源动特性的要求	27
1.7.1 电弧焊熔滴过渡与弧焊电源动特性的概念	27
1.7.2 焊条电弧焊熔滴过渡及其对弧焊电源特性的要求	28
1.7.3 细丝 CO ₂ 焊熔滴过渡及其对弧焊电源特性的要求	29
参考文献	30
第2章 弧焊电源	31
2.1 弧焊电源概述	31
2.1.1 弧焊电源的概念、分类及其特点	31
2.1.2 弧焊电源的基本原理和特点	31
2.1.3 弧焊电源的新发展	32
2.2 弧焊变压器的原理及其特点	32
2.2.1 弧焊变压器的基本原理及分类	32
2.2.2 串联电抗器式弧焊变压器	33
2.2.3 增强漏磁式弧焊变压器	35
2.3 弧焊发电机及硅弧焊整流器	37
2.3.1 内燃驱动式弧焊发电机的基本原理及其分类	37
2.3.2 硅弧焊整流器	39
2.3.3 交直流两用及脉冲式弧焊整流器	41
2.4 晶闸管式弧焊整流器及其特点	41
2.4.1 晶闸管式弧焊整流器的基本原理及特点	42
2.4.2 主电路的基本形式及其工作原理	42
2.4.3 移相触发电路的基本形式及其工作原理	44
2.4.4 外特性及调节性能原理	45
2.4.5 晶闸管式脉冲和矩形波交流弧焊电源	48
2.5 弧焊逆变器	49
2.5.1 弧焊逆变器概论	49
2.5.2 晶闸管式弧焊逆变器	53
2.5.3 晶体管和场效应晶体管式弧焊逆变器	54
2.5.4 IGBT 式弧焊逆变器	56

2.5.5 软开关型弧焊逆变器	60	原理	91
2.6 弧焊电源的数字化控制	62	4.3 埋弧焊材料及其选配	92
2.6.1 数字化控制的概述	62	4.3.1 焊丝	92
2.6.2 数字化控制的关键技术	63	4.3.2 焊剂	93
2.6.3 弧焊电源的单片控制	65	4.3.3 焊丝和焊剂的选配	96
2.6.4 弧焊电源的 DSP 控制	66	4.4 埋弧焊工艺	97
2.6.5 弧焊电源的 ARM 嵌入式控制	66	4.4.1 对接接头埋弧焊工艺	97
2.6.6 弧焊电源的数字化智能控制	67	4.4.2 T 形接头和搭接接头埋弧焊 工艺	99
2.7 弧焊电源的选择和使用	69	4.4.3 焊接参数对焊缝质量的影响	100
2.7.1 弧焊电源的选择	69	4.5 埋弧焊的其他工艺形式	106
2.7.2 弧焊电源的安装和使用	70	4.5.1 埋弧堆焊	106
2.7.3 弧焊电源的节电与安全	70	4.5.2 窄间隙埋弧焊	108
参考文献	71	4.6 埋弧焊的主要焊接缺陷分析	109
第3章 焊条电弧焊方法	72	4.6.1 气孔	109
3.1 焊条电弧焊的原理及熔滴过渡	72	4.6.2 裂纹	110
3.1.1 焊条电弧焊的原理及特点	72	4.6.3 埋弧焊焊接缺陷的产生原因及 防止措施	114
3.1.2 焊条电弧焊的熔滴过渡及其影响 因素	72	4.7 高速埋弧焊新工艺的特点及其设备	115
3.2 焊条电弧焊设备及焊条	74	4.7.1 单丝高速埋弧焊的工艺特点及其 设备	115
3.2.1 焊条电弧焊电源设备选配	74	4.7.2 双丝高速埋弧焊的工艺特点及其 设备	118
3.2.2 焊条的分类、特点及选用	74	4.7.3 三丝高速埋弧焊的工艺特点及其 设备	120
3.3 焊条电弧焊工艺特点及其对焊接参数的 要求	75	4.7.4 四丝高速埋弧焊在管线钢焊接中 的应用	121
3.3.1 焊接工艺特点及要求	75	参考文献	123
3.3.2 接头和坡口要求及设计	75	第5章 熔化极气体保护电弧焊	124
3.3.3 焊接参数的基本要求及其多参数 匹配	77	5.1 熔化极气体保护电弧焊的原理、 特点及应用	124
3.4 焊条电弧焊缺陷及安全与防护	78	5.1.1 熔化极气体保护电弧焊的分类	124
3.4.1 弧焊缺陷的产生及防止	78	5.1.2 熔化极气体保护电弧焊的基本 原理	124
3.4.2 焊条电弧焊的安全及防护技术	79	5.1.3 熔化极气体保护电弧焊的熔滴 过渡及冶金特性	125
3.5 焊条电弧焊的特殊方法	80	5.1.4 熔化极气体保护电弧焊的特点及 应用	133
3.5.1 重力焊和躺焊的特点及操作	80	5.2 熔化极气体保护电弧焊的设备组成及 其原理	134
3.5.2 高效焊条电弧焊方法	80	5.2.1 熔化极气体保护电弧焊设备的 分类与组成	134
参考文献	81	5.2.2 弧焊电源的选配原则	134
第4章 埋弧焊	82	5.2.3 其他辅助设备、配套件的选配	135
4.1 埋弧焊工作原理及其特点与应用	82		
4.1.1 埋弧焊工作原理	82		
4.1.2 埋弧焊的冶金与工艺特点及其 应用	82		
4.2 埋弧焊设备工作原理、分类及特点	84		
4.2.1 埋弧焊设备的分类与组成	84		
4.2.2 弧焊电源的电特性及其选用	85		
4.2.3 电弧调节系统及其工作原理	86		
4.2.4 机械与控制驱动系统及其工作			

5.2.4 熔化极气体保护电弧焊的控制 系统	139	6.2.2 TIG 焊弧焊电源选配原则	175
5.2.5 熔化极气体保护电弧焊设备的 选用原则	140	6.2.3 其他辅助设备、配套件的选配	180
5.2.6 熔化极气体保护电弧焊焊机 简介	140	6.2.4 焊接程序控制装置	185
5.3 熔化极气体保护电弧焊用气体及焊丝 的选配	141	6.2.5 典型的 TIG 焊机简介	185
5.3.1 保护气体的作用与特性	141	6.3 TIG 焊用焊接材料及工艺	187
5.3.2 保护气体的标准及其选用	144	6.3.1 钨极及其选用	187
5.3.3 工厂供气及流量控制方法	145	6.3.2 保护气体及其选用	189
5.3.4 焊丝分类及其性能对焊接工艺 性能的影响	147	6.3.3 焊丝及其选用	191
5.3.5 焊丝的标准及其选用	148	6.3.4 TIG 焊安全技术	191
5.4 熔化极气体保护电弧焊工艺的特点及 应用	149	6.4 TIG 焊其他方法和新技术	192
5.4.1 焊前准备	149	6.4.1 热丝 TIG 焊	192
5.4.2 焊接参数及其设定	150	6.4.2 TIG 点焊	193
5.4.3 常用材料的焊接	153	6.4.3 管-管和管-管板 TIG 焊	194
5.4.4 焊接缺陷的控制	156	6.5 TIG 高速焊技术	196
5.5 特殊熔化极气体保护电弧焊技术	157	6.5.1 活性剂 TIG 焊技术	196
5.5.1 熔化极气体保护焊电弧控制 技术	157	6.5.2 多元保护气(加氦等) TIG 高速 焊技术	198
5.5.2 熔化极脉冲氩弧焊的电弧控制	159	6.5.3 双电极 TIG 焊	198
5.5.3 熔化极气体保护气电立焊	160	6.5.4 TIG-激光复合能源高速焊技术	198
5.5.4 窄间隙熔化极气体保护电弧焊	162	参考文献	200
5.6 药芯焊丝 CO ₂ 气体保护焊的原理、 特点及应用	163	第 7 章 等离子弧焊接、喷涂与切割 基础	201
5.6.1 药芯焊丝的结构与分类	163	7.1 等离子弧的形成、特点及分类	201
5.6.2 药芯焊丝 CO ₂ 焊的原理与特点	164	7.1.1 等离子弧的形成	201
5.6.3 药芯焊丝 CO ₂ 焊设备	164	7.1.2 等离子弧的特点	202
5.6.4 药芯焊丝的标准及其选用	164	7.1.3 等离子弧的分类	202
5.6.5 药芯焊丝 CO ₂ 焊工艺	165	7.1.4 对等离子弧供电特性的要求	203
5.7 高效高速气体保护电弧焊技术	165	7.2 等离子弧焊的原理、工艺及设备	204
5.7.1 高效气体保护电弧焊技术	165	7.2.1 等离子弧焊的原理	204
5.7.2 高速气体保护电弧焊技术	167	7.2.2 等离子弧焊的工艺	205
参考文献	170	7.2.3 等离子弧焊设备	207
第 6 章 钨极惰性气体保护焊	173	7.3 等离子弧喷涂的原理、工艺及设备	210
6.1 TIG 焊原理及特点	173	7.3.1 等离子弧喷涂的原理	210
6.1.1 TIG 焊的工作原理	173	7.3.2 等离子弧喷涂的工艺	211
6.1.2 TIG 焊的特点	173	7.3.3 等离子弧喷涂的设备	213
6.1.3 TIG 焊的应用	174	7.4 等离子弧切割的原理、工艺及设备	214
6.2 TIG 焊设备配置	174	7.4.1 等离子弧切割的原理及特点	215
6.2.1 TIG 焊设备组成	174	7.4.2 等离子弧切割的方法及工艺	215
		7.4.3 等离子弧切割设备	218
		7.5 等离子弧焊新技术	218
		7.5.1 微束等离子弧焊技术	218
		7.5.2 穿孔等离子弧焊技术	219
		7.5.3 脉冲等离子弧焊技术	219
		7.5.4 变极性等离子弧焊技术	219

7.5.5 激光-等离子弧复合焊技术	220	8.2.4 水下切割安全技术	236
参考文献	220	8.3 螺柱焊技术	236
第8章 其他电弧焊与切割基础	222	8.3.1 螺柱焊工艺过程与设备	237
8.1 水下焊接	222	8.3.2 典型材料的螺柱焊焊接性能	242
8.1.1 湿法水下焊接	223	8.3.3 螺柱焊焊接方法的选择	242
8.1.2 高压干法水下焊接	226	8.3.4 螺柱焊焊接质量检验及焊接专用螺柱	243
8.1.3 局部干法水下焊接	229	8.4 碳弧气刨设备及工艺特点	244
8.1.4 水下焊接标准与质量检验	231	8.4.1 碳弧气刨的原理、特点及应用	245
8.1.5 水下焊接安全技术	232	8.4.2 碳弧气刨的设备与材料	245
8.1.6 水下焊接应用实例	233	8.4.3 碳弧气刨工艺及其参数匹配	247
8.2 水下切割	234	8.4.4 自动碳弧气刨特点及其设备	248
8.2.1 水下电弧-氧气切割	234	8.4.5 碳弧水气刨	249
8.2.2 水下等离子弧切割	235	参考文献	250
8.2.3 其他水下切割技术	235		

第2篇 压焊基础

第1章 压焊基础概述	254	2.6.5 车身焊装生产线的工艺仿真与规划技术	333
1.1 压焊的物理本质	254	2.6.6 电阻焊质量控制技术	333
1.2 压焊的分类及发展	254	参考文献	339
参考文献	257	第3章 扩散连接	341
第2章 电阻焊	258	3.1 扩散连接机理	341
2.1 点焊	259	3.1.1 固相扩散连接的基本原理	341
2.1.1 点焊的基本原理	259	3.1.2 液相扩散连接的基本原理	345
2.1.2 点焊的一般工艺	262	3.1.3 超塑性成形扩散连接的基本原理	347
2.1.3 常用材料及新材料的点焊	268	3.2 扩散连接的一般工艺	348
2.2 凸焊	273	3.2.1 扩散连接的工艺特点	348
2.2.1 凸焊的一般工艺	274	3.2.2 扩散连接参数的选择	349
2.2.2 常用金属材料的凸焊	276	3.3 常用材料的扩散连接	355
2.3 缝焊	279	3.3.1 钛合金及钛铝金属间化合物的扩散连接	355
2.3.1 缝焊的一般工艺	279	3.3.2 镍基高温合金的扩散连接	359
2.3.2 常用金属材料的缝焊	284	3.3.3 异种金属材料的扩散连接	361
2.4 对焊	286	3.3.4 陶瓷材料的扩散连接	365
2.4.1 闪光对焊	286	3.3.5 复合材料的扩散连接	371
2.4.2 电阻对焊	295	3.4 扩散连接设备	374
2.5 电阻焊设备	297	3.4.1 扩散连接设备的分类	374
2.5.1 电阻焊设备分类和组成	297	3.4.2 扩散连接设备的组成	374
2.5.2 电阻焊设备的主要技术参数	306	3.4.3 典型扩散连接设备及其工作原理	375
2.5.3 电阻焊设备的电极	311	参考文献	377
2.5.4 点焊机器人	315	第4章 摩擦焊	378
2.6 电阻焊技术的新发展	318	4.1 连续驱动摩擦焊	379
2.6.1 电阻焊接头形成理论研究进展	319		
2.6.2 电阻焊新工艺	323		
2.6.3 电阻焊新设备	329		
2.6.4 新型点焊机器人	332		

4.1.1 连续驱动摩擦焊的基本原理	379	5.1.2 高频焊的一般工艺	418
4.1.2 连续驱动摩擦焊的焊接工艺	382	5.1.3 高频焊设备的选择	422
4.1.3 焊接参数的检测及控制	386	5.1.4 高频焊应用实例	425
4.1.4 典型材料的摩擦焊	387	5.2 超声波焊	429
4.2 搅拌摩擦焊	392	5.2.1 超声波焊基本原理	429
4.2.1 搅拌摩擦焊的焊接过程	393	5.2.2 超声波焊的焊接工艺	430
4.2.2 搅拌摩擦焊工艺	396	5.2.3 超声波焊的焊接接头设计	434
4.2.3 典型材料的搅拌摩擦焊	400	5.2.4 超声波焊的焊接参数选择	435
4.2.4 搅拌摩擦焊新技术	403	5.2.5 常用材料的超声波焊	438
4.3 其他摩擦焊	407	5.2.6 超声波焊焊接设备	443
4.3.1 惯性摩擦焊	407	5.3 爆炸焊	446
4.3.2 线性摩擦焊	408	5.3.1 爆炸焊的基本原理	446
4.3.3 相位摩擦焊	409	5.3.2 爆炸焊工艺	448
4.3.4 径向摩擦焊	409	5.3.3 常用材料及典型工件的爆炸焊	451
4.3.5 摩擦堆焊	410	5.3.4 爆炸焊技术发展	455
4.4 摩擦焊焊接设备及其质量控制	411	5.3.5 爆炸焊的安全与防护	455
4.4.1 传统摩擦焊焊接设备	411	5.4 变形焊	456
4.4.2 搅拌摩擦焊焊接设备	413	5.4.1 变形焊概述	456
参考文献	415	5.4.2 变形焊工艺	458
第5章 其他压焊方法	417	5.4.3 典型材料及构件的焊接	463
5.1 高频焊	417	5.4.4 变形焊设备	464
5.1.1 高频焊的基本原理	417	参考文献	466

第3篇 钎焊基础

第1章 钎焊技术基础	468	第2章 钎焊方法	493
1.1 钎焊的基本原理	468	2.1 火焰钎焊	493
1.2 钎料的润湿与铺展	469	2.1.1 火焰钎焊的基本原理	493
1.2.1 固体金属的表面结构	469	2.1.2 火焰钎焊设备及工艺方法	493
1.2.2 液态钎料对固体母材的润湿	469	2.1.3 火焰钎焊的应用实例	495
1.3 钎料的毛细流动	471	2.1.4 火焰钎焊的操作与防护	496
1.3.1 拉普拉斯方程的推导	471	2.2 炉中钎焊	496
1.3.2 液态钎料的毛细填缝过程	472	2.2.1 空气炉中钎焊	497
1.4 钎料润湿性的影响因素	474	2.2.2 保护气氛炉中钎焊	497
1.4.1 钎料和母材的成分	475	2.2.3 真空炉中钎焊	497
1.4.2 温度的影响	476	2.2.4 炉中钎焊的操作与防护	498
1.4.3 金属表面氧化物的影响	477	2.3 电阻钎焊	499
1.4.4 钎剂的影响	478	2.3.1 电阻钎焊的基本原理	499
1.4.5 母材表面粗糙度的影响	478	2.3.2 电阻钎焊的工艺及特点	500
1.4.6 表面活性物质的影响	480	2.3.3 电阻钎焊应用实例	500
1.5 液态钎料与母材的相互作用	481	2.4 感应钎焊	501
1.5.1 母材向液态钎料的溶解	481	2.4.1 感应钎焊的基本原理	501
1.5.2 钎料组元向母材的扩散	484	2.4.2 感应加热线圈的设计	503
1.5.3 钎焊接头组织的不均匀性	487	2.4.3 感应钎焊的应用实例	503
参考文献	491	2.4.4 感应钎焊的操作与防护	504

2.5 浸渍钎焊	505	3.4.1 软钎剂	531
2.5.1 盐浴浸渍钎焊	505	3.4.2 硬钎剂	532
2.5.2 金属浴浸渍钎焊	506	3.4.3 铝合金用钎剂	533
2.5.3 浸渍钎焊应用实例	507	3.4.4 气体钎剂	535
2.6 其他钎焊方法	507	第4章 无铅钎焊技术	537
2.6.1 电子束钎焊	507	4.1 采用无铅钎焊技术的必要性	537
2.6.2 扩散钎焊	508	4.1.1 无铅钎焊技术的提出	537
2.6.3 超声波钎焊	508	4.1.2 铅的危害及污染途径	537
2.6.4 钎焊新技术	508	4.1.3 无铅钎焊技术面临的挑战	538
参考文献	511	4.2 无铅钎料简介	539
第3章 钎焊材料简介	512	4.2.1 Sn-Pb 系钎料	539
3.1 钎料和钎剂概述	512	4.2.2 Sn-Ag、Sn-Ag-Cu 无铅钎料 合金	540
3.1.1 钎料的分类和性能	513	4.2.3 Sn-Cu、Sn-Cu-Ni 无铅钎料 合金	546
3.1.2 钎剂的分类和性能	514	4.2.4 Sn-Zn、Sn-Zn-Bi 无铅钎料 合金	551
3.2 软钎料	516	4.3 无铅钎焊用钎剂简介	554
3.2.1 锡基和铅基钎料	516	4.3.1 钎剂的组成及分类	555
3.2.2 镉基、锌基和金基钎料	520	4.3.2 电子用钎剂的作用机理	555
3.2.3 低熔点钎料	522	4.4 无铅钎焊方法及设备	556
3.3 硬钎料	522	4.4.1 无铅波峰焊	557
3.3.1 铝基钎料	522	4.4.2 无铅回流焊	559
3.3.2 银钎料	523	参考文献	562
3.3.3 铜基钎料	527		
3.3.4 锰基钎料	528		
3.3.5 镍基钎料	529		
3.4 钎剂	530		

第4篇 高能束及其他焊接方法基础

第1章 激光焊接与切割	566	1.4 激光焊原理及特点	580
1.1 激光的产生原理	566	1.4.1 激光热传导焊原理及特点	581
1.1.1 原子能级结构	566	1.4.2 激光深熔焊原理及特点	581
1.1.2 原子的辐射跃迁与吸收跃迁	566	1.4.3 焊接熔池动力学	581
1.1.3 激励与粒子数反转	567	1.5 激光焊技术与工艺	582
1.1.4 光学谐振腔	567	1.5.1 激光热传导焊	582
1.1.5 激光特性	568	1.5.2 激光深熔焊	583
1.1.6 激光束质量特征描述	569	1.5.3 激光填丝焊	584
1.2 激光焊焊接设备	570	1.5.4 激光-电弧复合焊	586
1.2.1 激光焊焊接设备的组成	570	1.5.5 双光束激光焊	589
1.2.2 激光器	570	1.5.6 激光钎焊	590
1.2.3 光束传输与聚集系统	573	1.6 激光焊应用实例	592
1.2.4 工艺介质传输系统	575	1.6.1 法兰-管端环缝的激光深熔焊	592
1.3 激光焊时激光与材料的相互作用	576	1.6.2 铝合金激光填丝焊	592
1.3.1 金属材料对激光的吸收	577	1.6.3 船用钢板 T 形接头激光-电弧 复合焊	594
1.3.2 汽化和光致等离子体	579	1.6.4 双光束激光焊技术的应用	594
1.3.3 匙孔效应	580		

1.6.5 镀锌钢板的激光钎焊	596	3.1.1 电渣焊原理	643
1.7 激光切割的原理及特点	596	3.1.2 电渣焊工艺特点	643
1.7.1 激光切割的原理及分类	597	3.1.3 电渣焊过程	644
1.7.2 激光切割质量的影响因素	598	3.2 电渣焊工艺	644
1.7.3 连续激光切割的特性及应用	599	3.2.1 电渣焊方法	644
1.7.4 脉冲激光切割的特性及应用	600	3.2.2 电渣焊焊接参数	646
参考文献	601	3.2.3 电渣焊辅助工艺措施	648
第2章 电子束焊	603	3.3 电渣焊材料	649
2.1 电子束焊与深熔效应	603	3.3.1 焊丝	649
2.1.1 电子束焊工作原理	603	3.3.2 焊剂	649
2.1.2 电子束焊工艺特点	603	3.3.3 熔嘴	650
2.1.3 深熔效应	604	3.4 电渣焊设备	650
2.2 电子束焊工艺	607	3.5 电渣焊应用	651
2.2.1 电子束焊焊接参数及其对焊缝 形状的影响	607	3.5.1 箱形建筑钢结构隔板的电渣焊	651
2.2.2 电子束焊焊接参数的匹配	609	3.5.2 重型厂房柱子的管极熔嘴 电渣焊	653
2.2.3 电子束焊的特殊工艺规程	610	3.5.3 高炉炉壳纵缝电渣焊	654
2.2.4 电子束焊的接头设计	611	3.6 带极电渣堆焊	655
2.3 各种材料的电子束焊	613	3.6.1 带极电渣堆焊的特点	655
2.3.1 焊接性的影响因素	613	3.6.2 带极电渣堆焊设备和材料	656
2.3.2 中碳调质钢的焊接	614	3.7 振动调制电渣焊	658
2.3.3 不锈钢的焊接	615	参考文献	658
2.3.4 高温合金的焊接	620	第4章 气焊、气割与高压水射流 切割	660
2.3.5 钛合金的焊接	622	4.1 气焊	660
2.3.6 铝合金的焊接	624	4.1.1 气焊工艺	660
2.3.7 其他金属的焊接	626	4.1.2 气焊材料	664
2.4 电子束焊焊接设备	630	4.2 气割工艺及设备	664
2.4.1 电子束焊机的系统结构	630	4.2.1 气割的基本原理	665
2.4.2 电子束焊机的分类	631	4.2.2 气割工艺	666
2.4.3 电子束扫描控制系统	631	4.2.3 气割的应用	670
2.4.4 电子束焊的焊接过程控制	632	4.2.4 气焊与气割的设备及辅助器具	670
2.5 电子束焊的应用	633	4.3 高压水射流切割的工艺及设备	673
2.5.1 齿轮组合件的焊接	633	4.3.1 高压水射流切割的工作原理	673
2.5.2 汽车后桥壳的焊接	634	4.3.2 高压水射流切割的分类	673
2.5.3 铝合金汽车驾驶舱横梁的焊接	635	4.3.3 高压水射流切割的工艺特点	674
2.5.4 空间飞行器压力容器的焊接	635	4.3.4 高压水射流切割的工艺参数	675
2.5.5 导弹发射架的焊接	635	4.3.5 高压水射流切割的应用范围	678
2.5.6 动力舱段壳体的焊接	636	参考文献	679
2.5.7 薄壁空心铝球的焊接	638	第5章 热剂焊	680
2.5.8 铌钛异种金属直接电子束焊	639	5.1 热剂焊的原理及特点	680
2.5.9 固体火箭发动机壳体的焊接	641	5.1.1 热剂反应及反应产物	680
参考文献	642	5.1.2 钢中的冶金过程	682
第3章 电渣焊	643	5.2 热剂焊材料	684
3.1 电渣焊原理及特点	643		

5.2.1 热剂的组成及配方计算	684	6.3 胶接工艺	698
5.2.2 热剂的生产	686	6.3.1 胶接接头的设计	698
5.3 热剂焊工艺	687	6.3.2 表面处理	701
5.3.1 准备工作和钢轨处理	687	6.3.3 胶接工艺过程和方法	701
5.3.2 夹具和砂模的安装	688	6.3.4 固化工艺参数	702
5.3.3 热剂焊操作过程	689	6.3.5 胶接质量控制	702
5.3.4 焊后处理	689	6.4 胶粘剂和胶接性能测定	704
5.4 热剂焊的其他应用	690	6.4.1 胶粘剂的物理化学性能测定	704
5.4.1 导线的热剂焊特点	690	6.4.2 胶接力学性能检测	704
5.4.2 导线的热剂焊及其接头形式	691	6.4.3 无损检测	705
参考文献	692	6.5 胶接应用	705
第6章 胶接	693	6.5.1 胶接技术在土木工程行业的典型应用	705
6.1 胶接的特点及机理	693	6.5.2 胶接技术在汽车行业的典型应用	706
6.1.1 胶接的特点	693	6.5.3 胶接技术在航空行业的典型应用	706
6.1.2 胶接的机理	693	参考文献	707
6.2 胶粘剂	695		
6.2.1 胶粘剂的分类	695		
6.2.2 胶粘剂的选择	696		

第5篇 焊接过程控制及自动化基础

第1章 焊接过程自动控制技术	710	1.4.7 焊接过程的其他控制方法	749
1.1 焊接过程自动控制系统概述	710	参考文献	749
1.2 焊接过程控制的微处理器应用	710	第2章 焊接过程信号检测与故障诊断	750
1.2.1 单片机的应用原理及特点	711	2.1 焊接过程的传感器技术	750
1.2.2 DSP 数字信号处理器的应用原理及特点	714	2.1.1 焊接传感器的分类	750
1.2.3 ARM 嵌入式系统的应用原理及特点	721	2.1.2 位置传感器	750
1.2.4 PLC 可编程序逻辑控制器的应用原理及特点	724	2.1.3 霍尔式传感器	752
1.2.5 PC 计算机的应用原理及特点	726	2.1.4 电磁式传感器	753
1.2.6 其他数字处理器控制技术	728	2.1.5 光电式传感器	754
1.3 焊接过程控制系统的可靠性与电磁兼容技术	730	2.1.6 光学传感器	755
1.3.1 电磁兼容问题	730	2.1.7 电弧传感器	755
1.3.2 噪声的来源及其耦合方式	730	2.1.8 红外热像传感器	756
1.3.3 抗干扰方法及其设计	731	2.1.9 超声波传感器	756
1.4 焊接过程自动控制方法	733	2.1.10 其他传感器	757
1.4.1 焊接工艺的程序控制	733	2.2 焊接过程的信号检测	758
1.4.2 焊接质量控制原理	733	2.2.1 焊接过程的电参数检测	758
1.4.3 焊接过程的 PID 控制原理	737	2.2.2 焊接过程的视觉检测及信号处理	761
1.4.4 焊接过程的模糊控制原理	740	2.2.3 焊接过程的质量信号检测	762
1.4.5 焊接过程的人工神经网络控制	746	2.4 焊接过程故障诊断技术	764
1.4.6 焊接过程的专家控制原理	747	2.4.1 弧焊设备与焊接过程的故障诊断	764
		2.4.2 焊接过程的远程故障诊断	766

2.4.3 焊接过程的网络化监测与群控 技术	767	系统	821
参考文献	767	4.5.1 焊接自动化专用设备的组成与 功能	821
第3章 焊接过程的信息处理及质量 控制	768	4.5.2 主控计算机的种类	821
3.1 焊接过程的动态信息及控制	768	4.5.3 基于现场总线的控制系统	823
3.1.1 焊接过程动态信息的特点	768	4.5.4 焊缝跟踪控制与过程监视系统	825
3.1.2 焊接过程动态信息的检测	774	4.6 焊接自动化专用设备的设计	825
3.1.3 焊接过程动态信息的处理	776	4.7 典型焊接自动化专用设备	828
3.2 焊接过程的信号处理方法	780	4.7.1 板材拼接直缝焊接专机	829
3.2.1 小波分析理论及其在焊接中的 应用	780	4.7.2 筒体纵缝焊接专机	829
3.2.2 分形理论及其在焊接中的应用	784	4.7.3 环缝焊接专机	831
3.2.3 数学形态学分析及其在焊接中的 应用	787	4.7.4 管板自动焊接专机	833
3.2.4 其他信号分析方法及其应用	790	参考文献	833
3.3 焊接熔透的自动控制	792	第5章 焊接机器人	835
3.3.1 熔池图像处理	792	5.1 概述	835
3.3.2 熔透控制算法	796	5.1.1 工业机器人的定义、特点和 分类	835
3.3.3 TIG 焊熔透控制	797	5.1.2 工业机器人的发展历史	837
3.3.4 MAG 焊熔透控制	800	5.1.3 工业机器人的现状	838
3.4 焊缝识别及自动跟踪	803	5.1.4 常用机器人术语	838
3.4.1 焊缝位置检测	803	5.2 机器人的工作原理	839
3.4.2 焊缝自动跟踪	806	5.2.1 机器人工作原理简介	839
参考文献	809	5.2.2 机器人运动轨迹的实现	840
第4章 焊接自动化专用设备	810	5.2.3 机器人的关节伺服驱动及运动的 实现	841
4.1 概述	810	5.2.4 机器人的控制系统	842
4.1.1 焊接自动化专用设备的概念与 特点	810	5.3 典型焊接机器人系统	843
4.1.2 焊接自动化专用设备的种类	810	5.3.1 基本弧焊机器人系统	843
4.1.3 焊接自动化专用设备的发展 趋势	811	5.3.2 基本点焊机器人系统	844
4.2 焊接自动化专用设备的系统构成	812	5.3.3 焊接机器人系统常用的外围 设备	844
4.3 焊接自动化专用设备的焊接系统	813	5.3.4 复杂焊接机器人系统	845
4.3.1 对弧焊电源的要求及其外控 方式	813	5.4 机器人智能化焊接技术	847
4.3.2 对送丝机的要求	815	5.4.1 概述	847
4.4 焊接自动化专用设备的机械系统	815	5.4.2 焊接机器人离线编程与任务规划 技术	847
4.4.1 工件定位夹紧装置	815	5.4.3 机器人焊接路径实时跟踪与导引 技术	848
4.4.2 焊接机头及其移动机构	817	5.4.4 人-机器人协作控制技术	850
4.4.3 焊件变位机构及其动力装置	818	5.4.5 多焊接机器人协调控制技术	851
4.4.4 传动机构	820	5.4.6 遥控机器人焊接	851
4.5 焊接自动化专用设备的电气控制 系统	821	参考文献	854

绪论 焊接方法概述

在介绍焊接方法及其过程控制基本概念的基础上，介绍焊接方法的分类及其特点，简述电弧焊、压焊、高能束焊、钎焊和其他焊接方法，同时介绍焊接过程的自动控制技术、检测与伺服系统、信息处理与质量控制、焊接自动化专用设备和机器人，进而对焊接方法选择提出基本要求和简述焊接技术的新发展。

焊接（welding）是通过加热或加压，或者两者并用，用或不用填充材料，使工件达到结合的一种方法。其实质就是通过适当的物理-化学过程，使两个分离表面的金属原子接近到晶格距离（0.3~0.5nm）形成金属键，从而使两金属连为一体。

焊接方法（welding process）是指某种特定的焊接方法，如埋弧焊、气体保护焊等，其含义包括该方法所涉及的冶金、电、物理、化学及力学原理等内容。

0.1 焊接方法分类

焊接方法的种类很多，新的分类方法又不断出现，为此对焊接方法进行科学的分类很有必要。好的分类方法不仅便于读者了解各种焊接方法的特点和本质，还有利于为科学工作者不断创新、开发新的焊接方法提供有力的依据。焊接方法分类大致有族系法、一元坐标法、二元坐标法3种。

（1）族系法 基本上根据焊接工艺的某几个特征，分为几大类焊接方法，再根据其他特征细分小类，从而形成族系，如图0-1所示。其优点是按焊接工艺特征分类的层次可多可少，比较灵活，而且关系明确。缺点是分大类和分小类的根据原则不一致，易出现同一特点的方法有不同的细分类，由于分类界限过于机械，以致有些焊接方法无法归类，如钎焊中的波峰钎焊、无铅钎焊，固相焊接中的扩散焊、摩擦焊、闪光对焊及激光辅助搅拌摩擦焊（LB-FSW）和激光-高频焊（LB-HFRW）等复合焊接，熔焊中激光-电弧复合所产生的LB-TIG、LB-MIG、LB-PAW等复合焊接均无法归类。

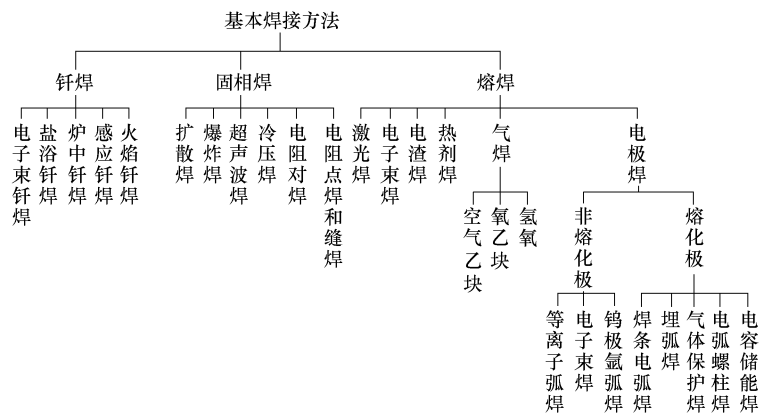


图 0-1 族系法—焊接方法分类

（2）一元坐标法 以焊接工艺的某两个特征作为归类原则。两个特征分别为纵、横坐标，并列表。再把各种焊接方法所具有的两个特征列入表内的某一坐标位置。其优点是可根据分类图直接

了解某一焊接方法的某些特征，也可根据这两个特征将某个焊接方法归入图中的某一位置，它属“开放型”分类法，适应性强。其缺点是统一以固定的两个特征（热源和保护方法）作为所有焊接方法归类原则，难以反映某个特定焊接方法的主要特征，更没有反映两种金属是在什么状态下，形成结合的最本质的特征。这种单纯以工艺的外部特征为分类原则的分类法称为一元坐标法，篇幅所限，这里不作介绍。

(3) 二元坐标法 在综合上述两种分类方法的优缺点基础上，提出二元坐标法，见表 0-1。它以焊接热源为一类（一元），在横坐标上分层次列出主次特征，又以焊接时物理冶金过程特征为另一类（一元），在纵坐标上分层次列出主次特征。在纵坐标上，主要是以两种材料发生结合时的物理状态为焊接过程的特征，即原子之间是在什么条件下互相结合，不仅可反映焊接过程的本质，而且还可用来预测和判断焊接接头的微观组织和结合的质量，以及可能发生的缺陷和对母材产生的影响；其次，在纵坐标中以焊接过程中材料是否熔化，是否加压或其他特征作为第二特征。

在横坐标上，对于热源类型按其强度大小，依次分为高能束、电弧热、电阻热、化学反应热、机械能、间接热源等类别，并按其各自特征又细分为若干类。如在电阻热大类中，分为熔渣电阻热和固体电阻热。固体电阻热又分为工频和高频、接触式和感应式等细类。

由此可见，二元坐标法既标出焊接方法的工艺特征，又说明两块材料结合的物理本质。在实际中，往往称呼某种焊接方法的全名，如二氧化碳气体保护焊、脉冲闪光对焊等。

据统计，1999 年已拥有焊接方法：电弧焊 18 种；硬钎焊 11 种；钎焊 8 种；电阻焊 9 种；固态焊接 9 种；氧乙炔焊 4 种；复合焊（激光 + TIG、激光 + MIG、激光 + 等离子等）、微焊接、其他焊接 10 种等。随着科学技术的进步，焊接方法也在不断发展，如俄罗斯汽车工业科学研究院发明的氙灯焊接工艺，它为金属、非金属材料的焊接提供了广泛的可能性，而且生产成本远低于激光焊。

众所周知，机械制造工业是国民经济的基础工业。它决定着一个国家的工业生产能力和水平，而焊接技术则是它的关键技术之一。根据国家的经济发展规划，许多工业部门不断地对焊接技术提出新的要求。

(1) 钢铁工业 它是焊接技术发展的基础，发达国家的焊接结构用钢均在一半以上。从 2007 年起，我国已是世界上钢铁生产量最大的国家。钢材用于制造用途不同的焊接结构，对焊接质量和自动化水平要求越来越高。

(2) 能源工业 它包括石油、天然气、煤炭、电力等工业领域，这些领域需要制造大量的化工容器、分馏装置和各种管线、高压锅炉，而焊接工艺占据十分重要地位。各类采油平台、炼油设备、发电设备等，不仅焊接工作量大，而且技术难度大和要求很高。

(3) 造船工业 造船工业，特别是大型造船业，不仅需要大量高性能、高可靠性的焊接设备与优质工艺，而且向着机械化、自动化和高效节能方向发展。其中高效化将提高到 80% ~ 90%，气体保护焊上升到 60% ~ 70%，自动化和半自动化程度提高 50% 以上。

(4) 汽车工业 汽车制造不仅需要大量的气体保护焊、电阻焊设备与工艺，还需要越来越多的激光切割与焊接、焊接机器人等先进焊接技术，以及 CAD/CAM 和 CIMS 技术。

(5) 航空航天工业 由于航空航天运载工具需要尽可能高的推动力重量比，必须采用铝、镁、钛及其合金等多种轻型材料和结构，因而需采用一些特殊的现代焊接技术，如电子束焊、激光焊、等离子弧焊、钎焊、超塑成形-扩散连接等。

此外，在电子工业中还广泛采用表面组装技术（SMT），其核心技术之一就是微电子软钎焊连接等。

0.2 焊接方法简介

按表 0-1 所介绍, 焊接方法种类很多, 这里仅简单介绍较常用的焊接方法。

1. 电弧焊

电弧焊是目前应用最广泛的焊接方法。它包括焊条电弧焊、埋弧焊、钨极惰性气体保护电弧焊(简称钨极氩弧焊或 TIG 焊)、等离子弧焊及切割、熔化极气体保护电弧焊(CO_2 焊、MIG 焊、MAG 焊)、药芯焊丝电弧焊、水下焊接与切割、螺柱焊、碳弧气刨、高效电弧焊等。绝大部分电弧焊是以电极与工件之间燃烧的电弧作为热源。在形成接头时, 可采用或不采用填充金属。电极是在焊接过程中熔化的焊丝时, 叫做熔化极电弧焊, 如焊条电弧焊、埋弧焊、熔化极气体保护电弧焊、药芯焊丝电弧焊等。电极是在焊接过程中不熔化的钨棒或碳棒时, 叫做不熔化极电弧焊, 如钨极惰性气体保护电弧焊、等离子弧焊等。

(1) 焊条电弧焊 焊条电弧焊是以焊条作为电极和填充金属, 用手工操纵焊条进行焊接的电弧焊方法。它是电弧焊方法中最简单、基本、灵活和应用得最多的焊接方法。在焊接过程中, 在焊条与工件之间建立起稳定燃烧的电弧, 电弧高温将焊条与工件的局部熔化, 熔化的焊芯以熔滴的形式过渡到局部熔化的工件表面, 与工件熔合在一起形成熔池。焊条药皮在电弧热的作用下产生气体和液态熔渣, 起隔绝大气和保护液体金属的作用。随着电弧的移动, 熔池金属逐步冷却结晶形成焊缝。它所用的设备简单, 操作轻便, 特别适合于装配、修补中的短焊缝和难以到达部位的焊接, 配用相应的焊条可适用于大多数工业用的碳钢、不锈钢、铸铁、铜、镍、铝及其合金的焊接。

(2) 埋弧焊 埋弧焊是电弧在焊剂层下燃烧进行焊接的方法, 是焊接生产中应用较广泛的工艺方法之一。埋弧焊时, 焊丝通过导电嘴穿过覆盖在待焊区表面的颗粒状焊剂层, 与母材之间产生电弧。在电弧热使焊丝、焊剂和母材熔化并被部分蒸发后, 在电弧区便由金属蒸气和液态焊剂构成一个弹性外膜的空腔, 使整个空间与空气隔绝, 电弧就在这个空腔中稳定燃烧。空腔底部是熔化的焊丝和母材形成的金属熔池, 顶部则是熔融焊剂形成的熔渣。随着电弧向前移动, 电弧力将熔池金属推向后方并逐渐冷却凝固成焊缝; 密度较轻的熔渣覆盖在熔池的表面, 有效地保护熔池金属不被氧化, 冷却后凝固成渣壳覆盖在焊缝表面。焊接时焊丝连续不断地送进, 其端部在电弧热作用下不断地熔化, 焊丝送进速度和熔化速度相互平衡, 以保持焊接过程的稳定进行。

它的焊接熔深大、生产效率高、机械化程度高, 特别适用于中厚板长焊缝的焊接。在造船、锅炉与压力容器、化工设备、桥梁、起重机械、工程机械、冶金机械以及海洋结构、核电设备等制造中埋弧焊都是主要的焊接方法。埋弧焊最适于焊接低碳钢和低合金高强度结构钢或不锈钢。

(3) 钨极惰性气体保护电弧焊 简称 TIG 焊, 是用纯钨极或活化钨(常用钍钨、铈钨等)作为非熔化电极, 并用惰性气体(如氩气、氦气或它们的混合气体等)作为保护气体, 利用电极与母材金属之间产生的电弧热熔化母材和填充焊丝(也可以不填充焊丝)的电弧焊方法。它通常被用于焊接厚度为 6mm 以下的焊件。从生产效率考虑, 以 3mm 以下为宜。脉冲 TIG 焊还可用于焊接厚度在 0.8mm 以下的薄板, 特别适用于全位置管道对接焊。TIG 焊可以采用手工焊也可以采用自动焊, 对于某些厚壁重要构件(如压力容器及管道), 在根部熔透焊道焊接(打底焊)、全位置焊接和窄间隙焊时, 为了保证提高焊接质量, 有时也采用它。TIG 焊用于几乎所有金属和合金的焊接, 特别是对铝、镁、铜等有色金属及其合金、不锈钢、耐热钢、高温合金和钼、铌、锆等难熔金属等的焊接最具优势。它已广泛应用于航空航天、核能、化工、压力容器、电器、医疗器械、金属家具、炊饮器具等设备制造工业。

(4) 等离子弧焊 等离子弧是电弧的一种特殊形式, 使气体充分电离而形成由数量相等的带

正电的正离子和带负电的电子所组成的电离气体称为等离子体。等离子弧具有温度高、能流密度高、化学活性高和可控性好等特点。利用等离子弧可进行焊接、喷涂和切割等工艺方法。它不仅用于对一般材料进行焊接、切割和喷涂,而且还能用于难以加工的材料。等离子弧焊生产效率高,利用小孔效应,也可对一定厚度范围的多数金属进行不开坡口的对接焊,节省焊接材料。等离子弧焊适用于绝大多数金属的焊接,特别适合不锈钢、铝、铜、镍基合金、钴基合金、铜基合金及各种铝合金的焊接和切割。

(5) 熔化极气体保护电弧焊 气体保护电弧焊(简称气体保护焊)有熔化极和不熔化极两种。熔化极气体保护电弧焊(GMAW)是在气体保护下,利用连续送进的焊丝与工件之间形成的电弧不断地熔化焊丝及母材形成熔池,冷却后形成焊缝的一种焊接方法。由于它效率高,对工件的热输入低及易实现焊接自动化等优点而得到广泛应用。

按保护气体种类不同及其中惰性气体比例不同熔化极气体保护电弧焊可细分为如下4类:

1) MIG焊:用氩气Ar或氦气He保护,称为熔化极惰性气体保护电弧焊,简称MIG焊,用于铝、钛、铜、镍等及其合金的焊接。

2) MAG焊:在氩气中加入少量的 CO_2 、 O_2 ,称为熔化极混合气体保护电弧焊,简称MAG焊,用于对焊缝成形、冲击韧度要求较高的低碳钢、低合金钢及不锈钢的焊接。

3) 混合气体保护电弧焊:保护气体是两种或两种以上的惰性气体,用于铝、钛、铜等及其合金的焊接。

4) CO_2 焊:用纯 CO_2 气体作为保护气体,称为二氧化碳气体保护电弧焊,简称 CO_2 焊,用于对焊缝成形、冲击韧度要求不高的低碳钢及低合金钢的焊接。

根据被焊工件材料的种类和厚度不同,配以不同品种、直径的焊丝,GMAW方法越来越广泛用于航空航天、原子能、造船、石油化工、汽车制造、冶金、机械制造、电力、仪表、建筑等行业,部分取代了焊条电弧焊及埋弧焊,成为一种常用的高效优质的焊接方法。

(6) 药芯焊丝电弧焊 它也是利用连续送进的焊丝与工件之间形成的电弧不断熔化焊丝及母材形成熔池,冷却后形成焊缝的一种焊接方法。焊丝有两大类:一类是实心焊丝;另一类是由金属外皮和药芯(即芯部药粉)构成的药芯焊丝。采用药芯焊丝作为电极和填充材料的电弧焊称为药芯焊丝电弧焊。它又分为外加保护气(主要是 CO_2)的气体保护药芯焊丝电弧焊和不加保护气的自保护药芯焊丝电弧焊两种。后者以管内药芯焊剂分解和熔化所产生的气体和熔渣,起保护熔池、渗合金及稳弧作用,而且焊丝伸出长度变化不会影响保护效果。药芯焊丝电弧焊可应用于大多数黑色金属的各种接头的焊接,越来越多地被我国和其他工业发达国家推广应用。

2. 压焊

压焊是在焊接过程中,必须对焊件施加压力(加热或不加热)以完成焊接的方法。在少数压焊过程中,焊接区金属熔化并同时被施加压力。多数压焊过程中,焊接区金属仍处于固相状态,依赖于在压力(不加热或伴以加热)作用下产生的塑性变形、再结晶和扩散等作用形成接头。

依照“族系法”分类规则,根据主要工艺特征,将压焊分为十大类:电阻焊、高频焊、扩散焊、摩擦焊、超声波焊、爆炸焊、变形焊、气压焊、旋弧焊、磁力脉冲焊等。每个大类又可细分为若干小类,如电阻焊(大类),以工艺方法又可细分如下小类:点焊、凸焊、缝焊、对焊、对接缝焊等。压焊广泛应用于航空、航天、核能、信息工程、汽车制造等工业部门。用压焊完成的焊接量,每年约占世界总焊接量的1/3,并有继续增加的趋势。

3. 高能束焊

高能束焊包括激光焊和电子束焊。

(1) 激光焊 1960年美国人T. H. 梅曼(Maiman)制成了世界上第一台激光器(红宝石激光

器), 标志着激光 (LASER) 技术的诞生。激光具有高亮度、高方向性、高单色性和高相干性四大特点, 当功率密度足够高时激光可使金属材料熔化, 熔化凝固后形成焊缝。激光器易于控制, 可与计算机数控系统或机械手、机器人配合, 实现自动焊接。激光束可通过光纤传输, 使激光焊接系统的加工柔性大大增加。激光焊接设备的组成可基本划分为激光器、光路系统、电器控制系统、加工机和辅助装置五个部分。激光焊可获得高精度、高质量、变形极小、美观的焊缝和接头。为充分利用其优越的特性和适应各种材料 (含难熔和异种金属)、结构的高效优质焊接工艺需求, 不断创新、开发和应用激光焊新方法, 如激光热传导焊、激光深熔焊、激光填丝焊、激光-电弧 (含 MIG、TIG) 复合焊、双光束激光焊、激光钎焊等。

(2) 电子束焊 以集中的高速电子束轰击工件表面时所产生的热能进行焊接的方法称为电子束焊。常用的有高真空电子束焊、低真空电子束焊和非真空电子束焊 3 种, 前两种因抽真空, 焊接质量较好, 但准备的时间较长, 工件尺寸受真空室限制。电子束也可与电弧复合进行高效优质焊接。与电弧焊相比, 电子束焊的主要特点是焊缝熔深大、熔宽小、焊缝金属纯度高。既可对电子束进行精密控制, 又可获得高密度能束, 既可精密焊很薄的材料, 又可焊厚达 300mm 以上的厚板。很适合用于焊接易氧化或难熔金属。设备成本较高, 不适于大批量产品的焊接。

4. 钎焊

钎焊、熔焊和压焊是现代焊接技术最重要的三大组成部分。钎焊和其他焊接方法最大的差别是采用比母材熔点低的填充材料 (钎料), 在低于母材固相线温度、高于钎料液相线温度的操作温度下, 通过熔化的钎料填充待连接母材的间隙, 随后冷却凝固, 形成钎焊接头。

根据使用的钎料不同, 钎焊可分为: 硬钎焊, 钎料液相线温度高于 450℃ 的钎焊; 软钎焊, 钎料液相线温度低于 450℃ 的钎焊。

随着人类社会进入 21 世纪, 以微电子技术为基础, 以计算机、通信技术为核心的电子信息技术已成为人类社会进步的主要推动力量。微电子封装中的互连技术也逐渐从传统的通孔组装技术 (Through Hole Technology, THT) 向表面组装技术 (Surface Mount Technology, SMT)、球栅阵列 (Ball Grid Array, BGA)、倒装芯片 (Flip-Chip) 和芯片级封装 (Chip Scale Package, CSP) 等高密度封装技术方向发展, 极大地促进了计算机、通信等众多高技术领域的进步。微钎焊、无铅波峰焊、回流焊等新工艺技术得以迅速发展。

5. 其他焊接方法

(1) 电渣焊 它是一种利用电流通过熔渣产生的电阻热作为热源的熔焊方法, 是一种在垂直位置或接近垂直位置使用的高效单道焊焊接工艺, 生产效率高。由前苏联巴顿焊接研究所于 1951 年发明, 用它代替大电流埋弧焊焊接厚壁压力容器上的纵向焊缝。电渣焊适用于焊接厚度 30 ~ 1000mm 的厚板或大断面钢结构, 在水压机、轧钢机、重型机械、桥梁、石化、锅炉压力容器、冶金、高层建筑等大型设备制造业中得到广泛使用。电渣焊适用于碳钢、合金钢、不锈钢、铝等金属材料的焊接。

(2) 气焊 它是利用可燃气体与助燃气体混合燃烧生成的火焰为热源, 熔化焊件和焊丝使之达到原子间结合的一种焊接方法。它的设备简单、使用灵活、成本低, 但变形大、生产效率低、热影响区宽, 操作危险性较大。

(3) 摩擦焊和搅拌摩擦焊 它们都是以摩擦或搅拌产生的机械能为能源, 进行金属的固相焊接。其生产效率高, 热影响区小, 主要用于横断面直径为 100mm 或更大直径零件的焊接。搅拌摩擦焊也可用于平板的焊接, 其发展也非常迅速。

(4) 其他焊接方法 如以高频电流在工件中产生固体电阻热的接触高频焊和感应高频焊; 以化学反应热为能源的固相焊的另一种焊接方法——爆炸焊; 以超声波-机械能为能源的超声波焊; 在高温和加压条件下, 以间接热能为能源, 经过原子互相扩散而结合的扩散焊。这些

焊接方法不仅可用于多种材料焊接，还可用于异种材料焊接，它们的发展也是多种多样和迅速的。

0.3 焊接方法的选择

焊接方法的选择必须保证焊接产品的优质可靠、生产效率高和费用低、经济效益较好等。其影响因素很多，主要选择依据概括如下。

1. 产品特点

(1) 产品结构类型 按焊接产品结构特点可分为以下4类。

- 1) 结构类：如桥梁、建筑工程、石油化工容器等。
- 2) 机械零件类：如汽车零部件等。
- 3) 半成品类：如工字钢、钢管等。
- 4) 微电子器件类。

产品根据焊缝长短、形状、焊接位置等不同，所用的焊接方法也不同。如结构规则的长直线或环焊缝宜选埋弧焊，短焊缝和打底焊选焊条电弧焊。机械零件类接头一般较短，可根据准确度要求，选用气体保护焊（一般厚度）、电渣焊、气电焊（重型构件宜于立焊）、电阻焊（薄板）、摩擦焊（圆形断面）或电子束焊（高精度）。半成品类的接头往往比较规则，适用机械化焊接方法，如埋弧焊、气体保护焊、高频焊等。微电子器件类接头要求密封、导电性、受热程度小等，宜用电子束焊、激光焊、超声波焊、扩散焊、钎焊和电容储能焊等。除此之外，还要考虑产品的其他特点。

(2) 工件厚度 每种焊接方法所用的热源不同，都有其适用的材料厚度范围。

(3) 接头形式和焊接位置 根据所用母材的厚度和形状，可分别采用对接、搭接、角接等接头形式。钎焊用于连接面积大而厚度小的搭接接头。一般根据结构要求和受力情况，焊接位置可能需要在平焊、立焊、横焊、仰焊和全位置等进行焊接。而平焊最容易、最普遍，且便于实现优质高效，尽量采用埋弧焊、熔化极气体保护焊。立焊宜用气体保护焊、气电焊或电渣焊（中大厚度）。

(4) 母材性能 焊接方法的选择还需考虑母材的性能，包括物理、力学、冶金等性能。常用材料适用的焊接方法，参考表0-2进行选择。

2. 生产条件

(1) 技术水平 除考虑制造厂家的设计、制造的技术条件外，还要特别考虑焊条电弧焊焊工的操作技术水平以及进行严格的培训，而埋弧焊、熔化极气体保护焊多数为机械化半自动焊、自动焊，对焊工操作水平要求相对较低，激光焊、电子束焊的设备和辅助设备较复杂，要求有更高的操作水平。

(2) 设备 每种焊接方法都需要配置一定的焊接设备。其基本组成为焊接电源，控制系统，焊枪/焊炬/焊钳、送丝、行走机构及工件变位等辅助设备。不同焊接方法及其机械与非机械化程度不同，其设备的基本组成也有所不同。焊接电源功率、设备复杂程度、功能、性能、成本等直接影响焊接生产质量、效率 and 经济效益，因此设备也是选择焊接方法的重要依据。

焊条电弧焊所需设备最简单，除需要一台弧焊电源外，只需配以焊接电缆和夹持焊条的焊钳即可，而熔化极气体保护电弧焊还需自动送丝机构、行走机构/焊车及其控制机构、焊炬、供气系统、冷却系统等，埋弧焊则需在焊车上加设焊剂送给功能取代保护气体系统，真空电子束焊需配用高压电源、真空室和专用电子枪，激光焊需配用功率激光器、导光、聚焦系统等。

表 0-2 常用材料的焊接方法选择参考表

材料	厚度 /mm	焊 接 方 法																									
		焊条 电弧 焊	埋弧 焊	熔化极气体保护焊				药芯 焊丝 电弧 焊	钨极 氩弧 焊	等离 子弧 焊	电渣 焊	气电 焊	电阻 焊	闪光 焊	气焊	扩散 焊	摩擦 焊	电子 束焊	激光 焊	硬钎焊							软钎 焊
				短路 过渡	射流 过渡	潜弧	脉冲 电弧													火焰 钎焊	炉中 钎焊	感应 加热 焊	电阻 加热 焊	浸渍 钎焊	红外 线钎 焊	扩散 钎焊	
碳钢	<3	★	★	★			★		★				★	★	★			★	★	★	★	★	★	★	★	★	
	3~6	★	★	★	★	★	★	★				★	★	★			★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	
	6~19	★	★		★	★	★	★				★	★	★			★	★	★	★						★	
	>19	★	★		★	★	★	★			★	★		★	★		★	★							★		
低合金钢	<3	★	★	★			★		★	★			★	★	★	★		★	★	★	★	★	★	★	★	★	
	3~6	★	★	★	★		★	★	★				★	★		★	★	★	★	★	★				★	★	
	6~19	★	★		★		★	★					★			★	★	★	★	★	★				★		
	>19	★	★		★		★	★			★			★		★	★	★			★				★		
不锈钢	<3	★	★	★			★		★	★			★	★	★	★		★	★	★	★	★	★	★	★	★	
	3~6	★	★	★	★		★	★	★	★			★	★		★	★	★	★	★	★				★	★	
	6~19	★	★		★		★	★		★				★		★	★	★	★	★	★				★	★	
	>19	★	★		★		★	★			★					★	★	★			★				★		
铸铁	3~6	★													★					★	★	★				★	★
	6~19	★	★		★			★							★					★	★	★				★	★
	>19	★	★		★			★							★						★					★	
镍及合金	<3	★		★			★		★	★			★	★	★			★	★	★	★	★	★	★	★	★	
	3~6	★	★	★	★		★		★	★			★	★			★	★	★	★	★				★	★	
	6~19	★	★		★		★			★				★			★	★	★	★	★				★		
	>19	★			★		★				★			★			★	★			★				★		

(续)

材料	厚度 /mm	焊 接 方 法																									
		焊条 电弧 焊	埋弧 焊	熔化极气体保护焊				药芯 焊丝 电弧 焊	钨极 氩弧 焊	等离 子弧 焊	电渣 焊	气电 焊	电阻 焊	闪光 焊	气焊	扩散 焊	摩擦 焊	电子 束焊	激光 焊	硬钎焊							软钎 焊
				短路 过渡	射流 过渡	潜弧	脉冲 电弧													火焰 钎焊	炉中 钎焊	感应 加热 焊	电阻 加热 焊	浸渍 钎焊	红外 线钎 焊	扩散 钎焊	
铝及合金	<3				★		★		★	★			★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
	3 ~ 6				★		★		★			★	★		★	★	★	★	★	★	★			★		★	★
	6 ~ 19				★				★				★			★	★		★	★			★		★		
	>19				★						★	★		★				★			★				★		
钛及合金	<3						★		★	★			★	★		★		★	★		★	★			★	★	
	3 ~ 6				★		★		★	★			★		★	★	★	★	★		★				★		
	6 ~ 19				★		★		★	★			★		★	★	★	★	★		★				★		
	>19				★		★						★		★		★				★				★		
铜及合金	<3						★		★	★			★				★		★	★	★	★			★	★	
	3 ~ 6				★		★			★			★			★	★		★	★		★			★	★	
	6 ~ 19				★								★			★	★		★	★					★		
	>19				★								★				★			★					★		
镁及合金	<3						★		★								★	★	★	★					★		
	3 ~ 6				★		★		★				★			★	★	★	★	★					★		
	6 ~ 19				★		★						★			★	★	★		★					★		
	>19				★		★						★				★										
难熔合金	<3						★		★	★			★				★		★	★	★	★		★	★		
	3 ~ 6				★		★			★			★				★		★	★					★		
	6 ~ 19												★														
	>19																										

注：★— 推荐采用的焊接方法。

(3) 焊接材料 如焊条、焊丝或填充金属、钨极、焊剂、钎料、钎剂、保护气体等。各种熔化极电弧焊都需要一定的消耗性焊接材料,如焊条电弧焊需要焊条,埋弧焊需要焊丝和焊剂,熔化极气体保护电弧焊需要焊丝和保护气体,电渣焊用的是焊丝、熔嘴或板极,电阻焊需要高电导率、较硬的铜合金电极等。

0.4 焊接技术的新发展

随着功率器件、微电子、计算机以及工业与其他科学技术的发展,焊接技术不断创新和发展。本书除介绍成熟或比较成熟的焊接技术外,将简单介绍焊接技术的新发展及其趋势。

1. 高效优质

提高生产效率和质量是驱动焊接技术发展的目标和巨大动力,也是永恒的方向。其主要途径和技术如下:

(1) 提高焊接熔敷率 除了过去采用的铁粉焊条、重力焊条外,正在继续发展双丝/多丝/热丝气体保护电弧焊、埋弧高速焊等技术,使熔敷效率比焊条电弧焊增加上百倍、焊接速度甚至提高数倍,而且构件变形小,焊缝成形美观优质。

(2) 减小坡口熔敷量 发展窄间隙单丝/双丝/多丝气体保护电弧焊,厚度 50 ~ 300mm 甚至更厚,间隙仅有 12 ~ 14mm,熔敷金属量数倍、数十倍减小,大大提高生产效率和质量。如采用高能束(电子束、等离子弧、激光)焊甚至可不开坡口对接,可获得更理想的效果。

2. 自动智能

发展焊接过程自动化、智能化技术,可大大提高焊接质量稳定性、生产率和改善焊工劳动条件,是发展焊接技术的另一重要方向。在劳动力成本越来越高和科技水平不断提高的今天,各种自动化、智能化专机、设备、自动焊接生产线等技术不断创新、涌现。其中焊接机器人从开环程控的第一代,到设有电弧传感、视觉传感、信息采样处理、跟踪焊缝成形、质量控制的实时过程闭环智能控制等的第三、四代技术,越来越广泛应用于汽车、管道、容器、航天、航空等领域。

3. 热源开发

焊接工艺几乎应用了世界上所有一切可利用的热源,其中包括火焰、电弧、电阻、超声、摩擦、电渣、等离子、电子束、激光束、微波等。从发展史来看,每一种热源的出现,都伴随着焊接新工艺的出现。随着科技的进步,研究、开发和利用焊接热源技术还不断在发展,主要表现可归纳为以下两方面:

(1) 改善优化原有的热源 提高热能密度、热效应和品质,使之更有效、方便、经济适用,如电子束、激光束等。

(2) 开发和综合利用热源 开发和综合利用复合热源,使之更有效地发挥不同热源的特点和优势,以便获得更高性价比的焊接结果,如“等离子弧+激光”、“MIG 电弧+激光”等。

4. 节能减排

节能减排是全世界工业界的共同努力方向。传统的焊接电源、设备不仅耗电很大,而且焊接工艺过程所产生的金属飞溅和烟雾,也是一个不容忽视的污染源。通过功率变频、逆变技术以及计算机、数字化控制焊接电源的输出波形、动态性能、功率因数等技术,不仅实现节能 20% ~ 35%,减少制造材料 60% ~ 80% 和大大减小体积、占地,还可大幅度减小金属飞溅和烟雾对环境的污染。此外,还从焊接材料(焊丝、焊条、焊剂和气体)的成分和性能改进及其优化匹配焊接参数,来减少焊接过程的飞溅、烟雾的污染。

5. 发展工艺

尽管目前的焊接技术和工艺方法足以满足当今焊接结构生产需求，但是新兴产业和材料品种发展及其结构性能提高需求，需要发展新工艺来适应它。如微电子工业的发展促进微连接工艺及其设备的发展，生物材料、陶瓷和复合材料的发展又促进了喷涂、粘接、真空扩散钎焊等技术的发展。

6. 安全防护

通常焊接作业的条件较差，为改善焊接工作环境和人身安全防护条件，除了提高面罩、工作服的防护性能外，还要开发通风、除尘效果更好的环保设备，同时发展抗电磁干扰能力强和减少电磁干扰的新型焊接电源、设备技术。

第 1 篇

▶▶ 弧焊基础

电弧焊（arc welding）是利用电弧作为热源的熔焊方法，简称弧焊。电弧焊是应用最广泛的焊接方法，包括焊条电弧焊、埋弧焊、钨极氩弧焊、等离子弧焊、熔化极气体保护电弧焊等。这些方法都离不开焊接电弧和为其供电的弧焊电源两个核心组成。研究弧焊方法原理、特点和应用之前，首先必须了解电弧的物理本质、电特性及其对弧焊电源的要求，进而选配相应弧焊工艺方法所需的焊枪、送丝机构、行走机构等辅助设备。

第 1 章 焊接电弧及其对弧焊电源的要求

本章是研究弧焊方法及其电源、设备与工艺的重要理论基础。介绍焊接电弧物理本质与特性、分类及其应用。从研究直流电弧入手，进而研究较复杂的交流电弧。简介脉冲电弧、自由电弧、压缩电弧。分析焊接电弧这一特殊负载及对其供电的弧焊电源的三项基本要求。

1.1 焊接电弧的物理本质、引燃及分类

1.1.1 焊接电弧的物理本质

焊接电弧是所有电弧焊方法的热源。它把电能转换成热能，对熔滴过渡、焊缝成形、质量等影响很大。

焊接电弧是由弧焊电源供给一定电压，在两电极或电极与母材间形成电场，使气体介质产生一种强烈而持久的放电现象，如图 1-1-1 所示。电弧稳定燃烧时，参与导电的带电粒子是电子和正离子。这些带电粒子是通过气体介质原子的激发、电离和电子发射等三个物理过程而产生的。在焊接电弧中，因质子撞击、高温热、光子能，而又分别产生撞击、热、光等三种电离和三种电子发射。在电弧温度下以一次电离为主，电子和正离子所带的电量相同，所受到的电场力相同。在电离的同时又存在电子和正离子复合。当电离速度和复合速度相等时，电离就趋于相对稳定的动平衡状态。由于电子的质量远远小于正离子的质量，其运动速度要远远大于正离子的运动速度。所以，电弧电流中约 99.9% 是电子流，正离子流只约为 0.1%。值得注意的是，在每一瞬间电弧中的正、负电荷数是相等的，焊接电弧对外呈电中性。

习惯上把这种放电现象称为电弧燃烧，这只是一形象化的称呼。焊接电弧与其他气体放电的区别在于其阴极压降低、电流密度大，而气体原子的电离和电子发射是电弧中最基本的物理现象。

1.1.2 焊接电弧的引燃

引燃焊接电弧的能量来源主要靠电场及由其产生的热、光和动能。而这个电场就是由弧焊电源提供的空载电压所产生的。必要时还短时叠加上一个较高的电压、电流，才能更好地引燃电弧。

焊接电源的引燃（引弧）一般有如下两种方式：接触引弧和非接触引弧。引弧过程的电压、电流变化曲线及接触引弧示意图如图 1-1-1a、b 所示。

（1）接触引弧 弧焊电源接通后，电极（焊条或焊丝）与工件直接短路接触，导电接触面积仅为少数突出点，电流密度极大，产生大量电阻热，使电极金属表面发热、熔化，引起热发射和热电离。随后拉开，就把电弧引燃了。这是焊条电弧焊和熔化极气体保护电弧焊最常用的引弧方式，如图 1-1-1c 所示。

（2）非接触引弧 指在电极与工件之间存在一定间隙，施以高压或高压脉冲击穿间隙，使电极表面产生电子自发射而引燃电弧，用于钨极氩弧焊和等离子弧焊。非接触引弧不会污染工件和损坏电极端部，但高频干扰使焊工易疲劳。

1.1.3 焊接电弧的分类及其应用

焊接电弧的性质与供电电源的种类、电弧的状态、电弧周围的介质以及电极材料有关，其分类如下。

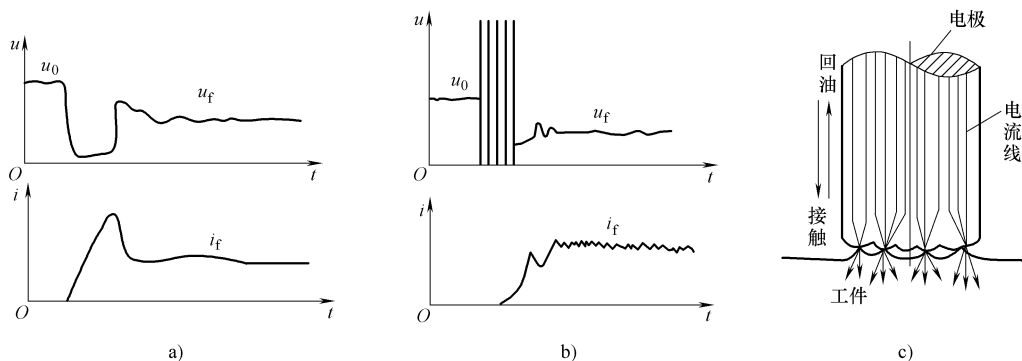


图 1-1-1 引弧过程的电压、电流变化曲线及接触引弧示意图

a)、b) 电压、电流变化曲线 c) 接触引弧示意图

 u_0 —空载电压 u_f —电弧电压 i_f —电弧电流

(1) 按电流种类分类 分为交流焊接电弧、直流焊接电弧和脉冲焊接电弧（包括高频脉冲焊接电弧）。

(2) 按电弧状态分类 分为自由电弧和压缩电弧。

(3) 按电极材料分类 分为熔化极电弧和非熔化极电弧。

1.2 直流焊接电弧的结构和电特性

1.2.1 焊接电弧的结构及其压降分布

为了便于理解，先从直流焊接电弧入手，再讨论交流焊接电弧，进而简介脉冲等其他类型焊接电弧。

如图 1-1-2a 所示，在两电极间产生电弧放电时，电弧沿着其长度方向电压分布不均匀，可分为三个区域：阴极区、阳极区和弧柱区。阴极区、阳极区宽度均很小，为 $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{ cm}$ ，而电压变化斜率很大。弧柱区位于中间占绝大部分长度、电压变化基本均匀，也称电弧等离子区。电弧长度可以视为近似等于弧柱长度，温度高达 $5000 \sim 50000 \text{ K}$ 。其温度的高低主要受电弧电流的大小、电弧周围气体介质的种类、热物理性能以及电弧状态等因素的影响。三个区的电压降分别称为阴极压降 U_i 、阳极压降 U_y 和弧柱压降 U_z ，并组成总的电弧电压 U_f ：

$$U_f = U_i + U_y + U_z \quad (1-1-1)$$

阳极压降、阴极压降基本不变（可视为常数），弧柱压降在一定气体介质下与弧柱长度成正比。弧长不同，电弧电压也不同。

1.2.2 焊接电弧的电特性

焊接电弧的电特性包括静特性和动特性。

1. 焊接电弧的静特性

一定长度的电弧在稳定状态下，电弧电压 U_f 与焊接电流 I_f 之间的关系称为焊接电弧的静特性，又称为伏安特性，其关系式为

$$U_f = f(I_f) \quad (1-1-2)$$

焊接电弧是非线性负载，即电弧两端的电压与通过电弧的电流之间不是成正比例关系，而是近似成 U 形曲线，故也称为 U 形特性，如图 1-1-2b 所示。可看成由三段（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）组成，在Ⅰ

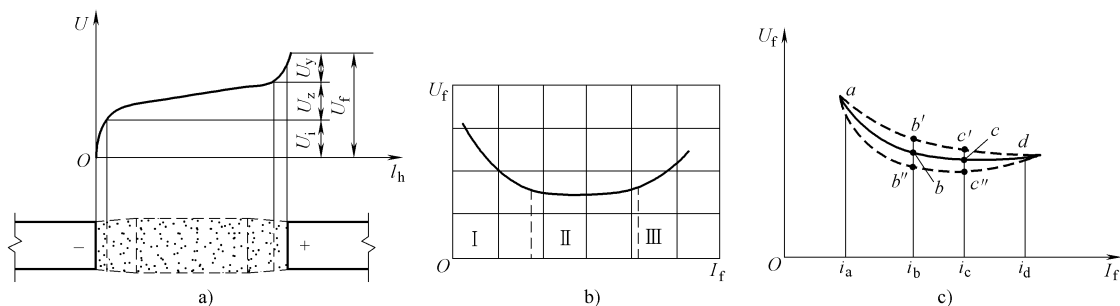


图 1-1-2 焊接电弧的结构及其压降分布和静、动特性曲线

a) 焊接电弧的结构及其压降分布 b) 静特性曲线 c) 动特性曲线

段，电弧电压随焊接电流的增加而下降，是下降特性段；在Ⅱ段，呈等（恒）压特性，即电弧电压不随焊接电流而变化，是平特性段；在Ⅲ段，电弧电压随焊接电流的增加而上升，是上升特性段。

不同焊接方法的电弧静特性曲线不同，在正常使用范围内并不是都包括电弧静特性曲线的三个段。下降段电弧不稳定，很少采用。焊条电弧焊、埋弧焊多工作在水平段，非熔化极气体保护焊、微束等离子弧焊、等离子弧焊也多在水平段；熔化极气体保护焊（氩弧焊和 CO_2 焊）和水下焊多在上升段。

2. 焊接电弧的动特性

在稳定状态下的电弧静特性如图 1-1-2c 的 $abcd$ 曲线所示。焊接电弧动特性是指在一定弧长下，当电弧电流快速变化时，电弧电压和电流瞬时值之间的关系： $u_f = f(i_f)$ 。图 1-1-2c 中，电流由 a 点快速增加到 d 点，因电压变化总是滞后于电流变化的热惯性影响，而形成 $ab'c'd$ 虚线；当电流由 d 点快速减小到 a 点时，形成 $ab''c''d$ 曲线，与 $dc'b'a$ 构成动特性回形曲线。当电流变化速度越小，静、动特性曲线就越接近。

1.2.3 焊接电弧力

在熔化极电弧焊过程中，电弧燃烧过程既产生大量热能，又产生一些被称为电弧力的机械力。电弧力对熔滴过渡、焊缝成形及焊接过程等均影响很大。

1. 电弧力的种类

(1) 电磁收缩力 根据电工原理，可把一个导体通过电流，看成由无数条方向相同的电流线组成，并在线间产生相互吸引的电磁力，使流体导体（如液体、气体）变形产生收缩，如图 1-1-3 所示。这个电磁力 F_1 、 F_2 称为电磁收缩力。焊接电弧两电极尺寸相差悬殊，通常焊条（焊丝）直径很小而工件尺寸很大。电弧在焊条（焊丝）上受到电极尺寸的限制，在工件上则可自由扩展，就形成一个断面不断变化的圆锥体，如图 1-1-4 所示，其任意一点 A 的坐标为 (L, φ) 。当电流均匀分布时 A 点所受到的电磁收缩力 F_A 为

$$F_A = \frac{2I_f^2}{\pi L^2 (1 - \cos\theta)^2} \ln \frac{\cos(\varphi/2)}{\cos(\theta/2)} \quad (1-1-3)$$

式中 I_f ——焊接电流；

θ ——1/2 锥顶角；

φ —— A 点与电极轴线的夹角；

L —— A 点距锥顶的距离。

从式 (1-1-3) 可知， A 点的 F_A 与 I_f^2 成正比，与 L^2 成反比，且与 θ 、 φ 角有关。用该式绘出

电弧中电磁收缩力的等压曲线，如图 1-1-5 所示，圆锥形电弧每个断面上的电磁收缩力不一样，断面大的电磁收缩力小。这种压力差的存在，产生一个由小断面（焊条与焊丝）指向大断面（工件）的推力 F_t ：

$$F_t = KI_f^2 \ln \frac{R_b}{R_a} \tag{1-1-4}$$

式中 F_t ——电弧的推力；
 I_f ——焊接电流；
 K ——系数， $K = \mu / (4\pi)$ (μ 为介质磁导率)；
 R_a ——锥形电弧的上底面半径；
 R_b ——锥形电弧的下底面半径。

这个力称为电弧静压力，在电弧中心最大，在电弧边缘较小，使熔池形成凹陷熔深。

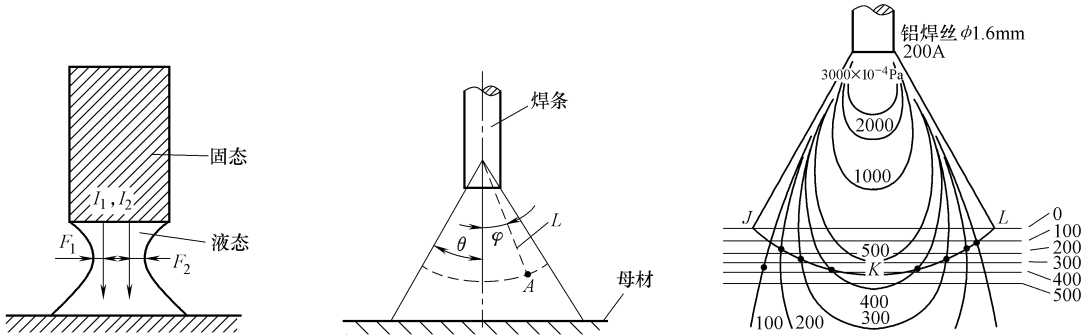


图 1-1-3 流态导体电磁收缩力 图 1-1-4 圆锥形电弧模型 图 1-1-5 电磁收缩力等压曲线

(2) 等离子流力 等离子体是在温度高、电流密度大的电弧中心部分高度电离而形成的一种电弧等离子体。电弧导电截面的变化形成了由焊条指向工件的推力 F_t ，并推动等离子体向工件运动，形成高速流动的等离子流，如图 1-1-6 所示。为了保持流动的连续，外部的冷气流将从电极端部 C 区进入电弧，迅速被加热电离后受 F_t 力的作用，从 A 区冲向 B 区，其速度高达数百米每秒，使熔池受到较大的等离子流力（也称电弧动压力），如图 1-1-7 所示。该力在电弧中心线上最大，是成为图 1-1-8a 所示指状熔深的一个重要原因，而一般电弧形成的熔深如图 1-1-8b 所示。

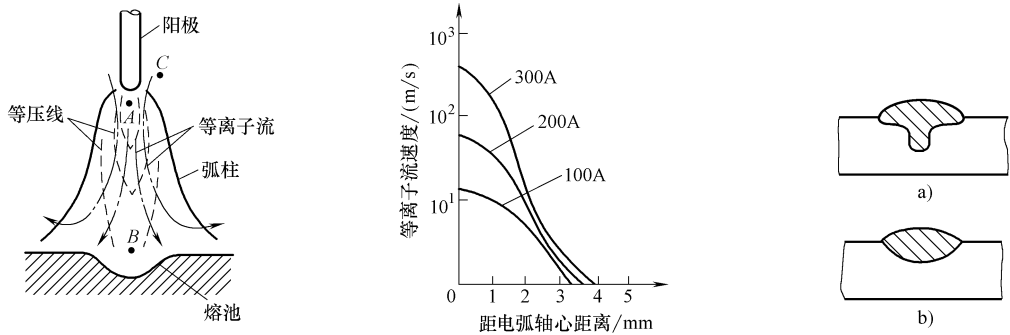


图 1-1-6 等离子流 图 1-1-7 等离子流速度分布 图 1-1-8 焊缝熔深
a) 等离子流形成的熔深
b) 一般电弧形成的熔深

(3) 斑点压力 当电极上形成电流密度高的光点(斑点)时,电流将大部分从斑点处流入流出,其密度最大,温度最高,使斑点处形成较大的斑点压力。斑点压力主要由带点粒子撞击力、电磁收缩力、电极材料蒸发的反作用力构成。

通常,阴极斑点压力要比阳极斑点压力大得多。斑点压力阻碍电极熔化金属过渡,斑点压力太大时,可能造成较大的飞溅。

(4) 爆破力 短路过渡时,金属液柱受到较大电磁收缩力而产生缩颈和液态金属小桥。短路电阻的高热使小桥温度急升和形成爆破力,使液柱汽化爆断和产生飞溅。

(5) 细熔滴的冲击力 在采用 Ar 或富 Ar 气体保护大电流焊接时,焊丝的熔化金属在等离子流力的作用下,以很小的体积和四五十倍于重力加速度的加速度沿电极轴线冲向熔池,对熔池形成很大的压力,并与等离子流力共同作用,较易形成指状熔深。

2. 电弧力的影响因素

影响电弧力的因素很多,但归纳起来主要有以下几种因素。

(1) 气体介质 当气体介质是多原子气体或者热导率比较大时,对电弧的冷却能力增加,迫使电弧收缩,使电弧力增加。

(2) 电流和电压 电弧中电磁收缩力与电流的平方成正比,电弧力随电流增加而猛增。弧长随电弧电压的增加而变长,致使电弧飘摆性增加和电弧力减小。

(3) 焊条(焊丝)的直径 焊条(焊丝)的直径越细,电流密度越大,电磁力越大,使电弧力增大。

1.3 交流焊接电弧的特点及其电特性

1. 交流焊接电弧的特点

交流焊接电弧的物理本质及其静特性与直流焊接电弧基本相同,然而,交流焊接电弧作为弧焊电源的负载还有其特殊性。

交流焊接电弧一般是由 50Hz 按正弦规律变化的弧焊电源供电,电弧电流过零点及其电弧熄灭和引燃过程每秒出现 100 次。这就使交流焊接电弧放电的物理条件也随着改变,具有特殊的电和热的物理过程,对电弧的稳定燃烧及其对弧焊电源要求有很大的影响。

交流焊接电弧最大的特点是电弧周期性地熄灭和引燃。交流电流每当经过零点并改变极性时,电弧熄灭、电弧空间温度下降,使下半周期电弧重新引燃困难,只有当弧焊电源电压 u_y 增至大于引燃电压 U_{yh} 后电弧才可能引燃和稳定燃烧,即 $t=0$ 时, $u = U_m \sin \varphi \geq U_{yh}$, 这是交流电弧稳定燃烧的条件之一。如果焊接回路中没有足够大的电感时,从上半波电弧熄灭至下半波电弧重新引燃之前,可能有一段电弧熄灭时间,并引起图 1-1-9a 所示的电流波形畸变,使其不按正弦规律变化。如有足够大的电感,就可阻止电流 i_f 减小,维持电弧继续燃烧,使熄弧时间为零,即 $\omega t = \pi$ 时, i_f 正好过零点,获得图 1-1-9b 所示电弧连续燃烧的正常波形,这是交流电弧稳定燃烧条件之二。显而易见, U_{yh} 越小,熄弧间隔越短,重新引弧越容易,电流波形畸变越小,电弧越稳定。

图 1-1-10 所示为经简化的交流焊接电弧供电电路原理图,可满足上述交流电弧的两个连续燃烧条件。

在考虑交流电弧连续燃烧两个条件下,通过对上述电源电压方程式的推导,可得出保证电路中各项参数符合交流电弧连续燃烧条件方程式的关系如下:

$$\frac{U_0}{U_f} \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{U_{yh}^2}{U_f^2} + \frac{\pi^2}{4}} \quad (1-1-5)$$

由式 (1-1-5) 描绘出交流电弧连续燃烧范围, 如图 1-1-11 所示, 曲线左上方是电弧连续燃烧区, 右下方是不连续燃烧区。

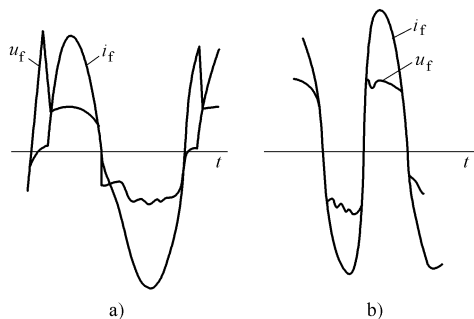


图 1-1-9 交流埋弧焊电弧电压和电流波形
a) 不连续燃烧畸变波形 b) 连续燃烧正常波形

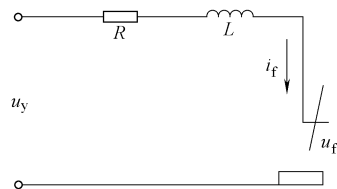


图 1-1-10 经简化的交流焊接电弧供电电路原理图

2. 提高交流焊接电弧稳定燃烧的措施

综上所述, 为了提高交流电弧的引弧性、稳定性, 在弧焊电源方面需采取如下措施:

- 1) 适当提高空载电压, 要求 $U_0/U_f \approx 1.5 \sim 2.4$ 。
- 2) 适当增大焊接回路的 L 或减小 R 。
- 3) 适当增大电流 I_f , 使电弧空间能量、热惯性增大, 利于降低引弧所需电压, 提高稳定性。
- 4) 采用过零点时间为零的矩(方)形波交流。
- 5) 叠加高压脉冲或高频高压电流。

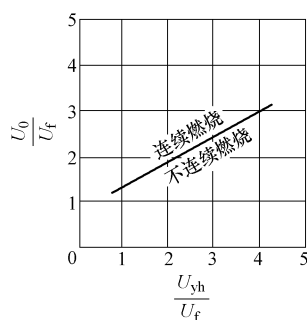


图 1-1-11 交流电弧连续燃烧范围

电路参数对电弧稳定性的影响及动特性如图 1-1-12 所示。

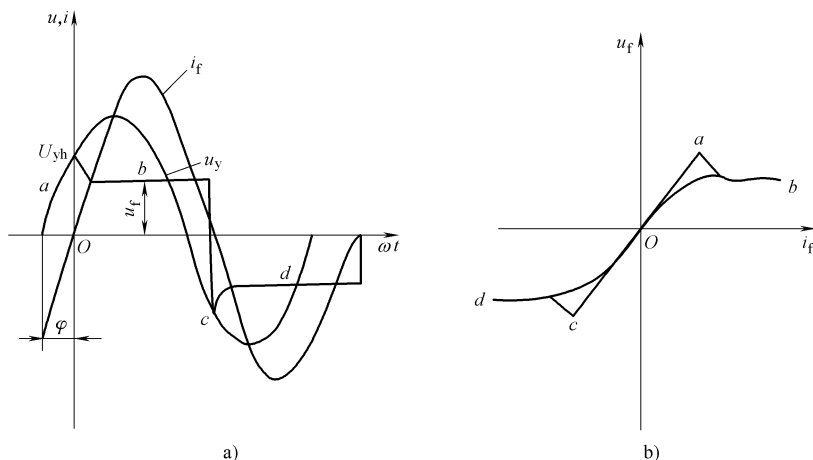


图 1-1-12 电路参数对电弧稳定性的影响及动特性
a) 电路参数的综合影响 b) 交流电弧动特性曲线

3. 交流焊接电弧的功率和功率因数

用交流电弧进行焊接, 要求充分利用电弧功率, 以获得较高的效率, 还希望在弧长略有变化时功率保持稳定, 使焊接过程顺利进行, 研究交流电弧功率及功率因数的影响因素和计算方法是必要的。

(1) 交流焊接电弧的功率 交流电弧的功率是指交流电弧在半个周期 (π) 内的平均功率

(又称为有功功率), 见式 (1-1-6a)。另外, 焊接回路的电感较大, 引燃电压不很大且存在的时间很短, 可近似看成在每半个周期中电弧电压是不变的矩形波, 即 $u_f = U_f$, 通过公式推导, 可得到交流焊接电弧有功功率为式 (1-1-6b):

$$P_f = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_f i_f d\omega t \quad (1-1-6a)$$

$$P_f = 0.905 \frac{U_0^2 K}{X_L} \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{8} K^2} \quad (1-1-6b)$$

式中 P_f ——交流电弧的有功功率;

u_f 、 i_f ——电弧电压和电弧电流的瞬时值;

K —— U_f/U_0 ;

X_L —— $X_L = \omega L$ 。

根据式 (1-1-6b), 可作出 P_f 曲线, 如图 1-1-13 所示, $K < 0.4$ 或 $K > 0.637$ 时, 均不利于保持电弧燃烧和电弧功率的稳定, K 值最好取 $0.4 \sim 0.637$, 即要求:

$$2.5 > U_0/U_f > 1.57 \quad (1-1-7)$$

(2) 交流电弧的功率因数 交流正弦波功率因数 λ_f 是指交流有功功率 P_f 与 $U_f I_f$ 乘积之比值, 交流电弧的 U_f 、 I_f 波形非正弦波, 其 $P_f \neq U_f I_f$ 。 λ_f 表明 U_f 、 I_f 波形畸变所带来的影响。当电弧连续性差时, 波形畸变就严重。 λ_f 相应较小, 电弧所提供的功率也就小。 λ_f 的表达式为

$$\lambda_f = 0.905 \sqrt{\frac{1 - \frac{\pi^2}{8} K^2}{1 - 1.18 K^2}} \quad (1-1-8)$$

在一般焊接中, $K = 0.4 \sim 0.56$, 所以 $\lambda_f = 0.89 \sim 0.90$ 。可见 λ_f 总是小于 1 的。

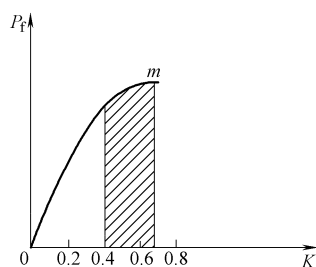


图 1-1-13 P_f 与 K 的关系
(阴影区是工作区)

1.4 其他类型焊接电弧

1.4.1 脉冲焊接电弧

电流为脉冲波形的焊接电弧称为脉冲焊接电弧, 它可分为直流脉冲焊接电弧和交流脉冲焊接电弧。脉冲焊接电弧与一般电弧的区别在于, 电弧电流周期地从基本电流 (I_j) 增至脉冲电流幅值 (I_m), 如图 1-1-14 所示。基本电流用于在脉冲休止时间 (t_2) 来维持电弧的连续燃烧, 脉冲电流时间 (t_1) 用于熔化工件和焊丝, 使熔滴从焊丝脱落和向工件过渡。除了上述脉冲参数, 还有频率 ($f = 1/T$) 等参数调节范围很宽。在同样的平均电流下, 峰值电流较大, 熔池处于周期性地加热和冷却的循环之中, 可有效地控制焊接热循环、熔滴的过渡、熔池的形成和焊缝的结晶。

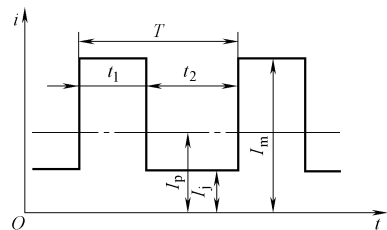


图 1-1-14 脉冲焊接电弧电流波形图

脉冲电弧的电流波形有许多种形式: 矩形波脉冲、梯形波脉冲、正弦波脉冲和三角形波脉冲等。在功率电子和微电子技术非常发达的今天, 任意形状的脉冲波形几乎都能够实现。

脉冲电弧还有非熔化极脉冲电弧、熔化极脉冲电弧和脉冲等离子弧之分。这三种脉冲电弧既有共同之处，又各具有自身特点。

1.4.2 自由焊接电弧

自由焊接电弧可分为非熔化极焊接电弧和熔化极焊接电弧两种。

1. 非熔化极焊接电弧

电极本身在焊接过程中不熔化，没有金属熔滴过渡，通常都采用惰性气体（如氩气、氦气等）保护。我国因氦气价格昂贵，大多数采用氩气保护，电极多采用钨极掺有少量电子自发射强的钍或铈等稀土金属。这种电弧通常称为钨极氩弧或 TIG 弧。

钨极氩弧又分为直流、交流、脉冲电弧三种。直流钨极氩弧点燃后非常稳定，它和脉冲电弧常用来焊接薄板或打底焊。正弦波钨极氩弧电流每秒 100 次过零点和 100 次重新引弧。氩气的电离电压很高，氩弧的引燃电压比一般电弧高得多。正弦波供电的交流钨极氩弧电弧稳定性较差，需要考虑稳定交流电弧的措施。

2. 熔化极焊接电弧

熔化极作为电弧一个极，在电弧燃烧过程中不断熔化并将熔化金属过渡到工件。熔化极电弧可分为明弧和埋弧两大类。

明弧的电极也有两种，一种是在金属丝表面敷有涂料的焊条，涂料中含有大量稳弧剂，这种可见的明弧很稳定。根据涂料成分不同，可分为直流弧焊和交流弧焊。另一种明弧是采用光电极（光焊丝）和采用保护气体，保护气体可以是惰性气体，如氩气；也可以是活性气体，如 CO_2 、 $\text{CO}_2 + \text{Ar}$ 、 $\text{O}_2 + \text{Ar}$ 、 $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ 等，还可利用这两类气体的混合气体保护电弧。此外，采用含有稳弧药芯的焊丝和采用或不采用保护气体进行焊接的所谓自保护电弧，也属这种明弧。

埋弧焊采用的也是光焊丝，但电弧被埋在含有稳弧元素的颗粒状焊剂（焊药）中燃烧。这种稳定性很好的埋弧既可是直流电弧，也可是交流电弧。

熔化极借助自动送进机构或人工连续地向电弧区送进，以维持弧长基本不变。电极在熔化过程中形成的熔滴大小和过渡方式不同，在焊接过程中引起弧长变化及其稳定性也不同。

1.4.3 压缩焊接电弧

如果把上述自由焊接电弧的弧柱强迫压缩，在机械压缩、磁收缩、热收缩效应作用下，就获得一种比一般电弧温度更高、能量更集中的热源，即压缩焊接电弧。等离子弧就是一种典型的压缩焊接电弧，有三种形式：

（1）转移型等离子弧 电极接负极，工件接正极，等离子弧产生于电极与工件之间，如果电极冷却条件及其耐高温性能较好，则也可电极接正极，工件接负极。

（2）非转移型等离子弧 电极接负极，喷嘴接正极，等离子弧在其两极之间产生。

（3）混合型等离子弧 上述两种等离子弧结合同时工作就称为混合型等离子弧，常用于微束等离子弧焊和等离子弧喷焊。

这三种形式的等离子弧均采用非熔化电极，也具有非熔化极电弧的特点，影响电弧稳定性的主要因素是电弧电流和空载电压。常用直流和脉冲等离子弧，也有用交流等离子弧。

20 世纪 70 年代还出现熔化极等离子弧，可视为等离子弧和熔化极电弧的结合。等离子弧在非熔化极与工件之间形成，通过熔化极（焊丝）过渡熔滴，具有两种电弧特点。此外还有熔化极电弧（如 MIG 电弧）与激光结合等复合热能的形式，集成各自长处，提高能量密度，增强电弧刚性，加大熔深和提高焊接速度、效率、质量。

1.5 弧焊工艺对弧焊电源外特性的要求

焊接电弧是弧焊工艺的热源。弧焊电源是电弧能量供应者和电弧焊设备核心,其电特性好坏直接影响电弧燃烧的稳定性及焊接质量、效率。它除满足一般电力电源常规要求外,电气特性和结构等还要满足电弧负载特性及其弧焊工艺适应性要求:保证引弧容易、参数稳定及足够宽的调节范围。为此,弧焊电源电特性还应考虑三个基本要求:对外特性要求、对调节性能要求、对动特性要求。

此外,在特殊环境下(如高原,水下和野外焊接等)工作的弧焊电源,还必须具备相应的对环境的适应性。为适应新型弧焊工艺发展的需要和要求,还要研制出具有相应电气性能的新型弧焊电源。

1.5.1 “电源-电弧”系统的稳定性

在内部参数一定的条件下,改变负载时,弧焊电源输出稳定的电压 U_y 和电流 I_y 之间的关系称为弧焊电源的外特性。对于直流、交流弧焊电源的 U_y 和 I_y , 分别为平均值、有效值。它的供电对象不是电灯、电炉这类线性电阻负载,而是特殊的非线性负载——焊接电弧。它要有怎样的外特性才能确保电弧、焊接参数稳定还有待深入讨论。

如图 1-1-15a 所示,在电弧焊中,弧焊电源是供电者,焊接电弧是用电者,两者构成“电源-电弧”系统。该系统的稳定性包含如下两方面的含义。

1. 系统无外界干扰能保持稳定燃烧

系统无外界干扰时,在给定电弧电压和电流下,能维持长时间的连续电弧放电,保持静态平衡,应有如下关系:

$$U_f = U_y; I_f = I_y \quad (1-1-9)$$

式中 U_f 、 I_y ——分别为电弧电压和电弧电流的稳定值。

为满足式 (1-1-9), 弧焊电源外特性 $U_y = f(I_y)$ 与电弧静特性 $U_f = f(I_f)$ 必须能够相交, 如图 1-1-15b 所示, 弧焊电源外特性 1 与电弧静特性 2 相交于 A_0 和 A_1 点。这两个交点确定了系统的静态稳定状态。但因实际操作的不稳定、工件表面不平 and 网路电压突然变化等外界干扰, 都会破坏这种静态平衡。

2. 系统外界瞬时干扰能自动平衡

当系统一旦受到瞬时的外界干扰, 破坏了原来的静态平衡, 造成了焊接参数变化。在干扰消失之后, 系统能够自动地达到新的稳定平衡, 使焊接参数重新恢复。为了满足上述系统稳定性要求, 暂不考虑熔化极的电弧自身调节作用, 只考虑焊接电路电感的影响, 分析系统的动平衡方程式如下:

$$U_y(I) = U_f(I) + L \frac{dI}{dt} \quad (1-1-10)$$

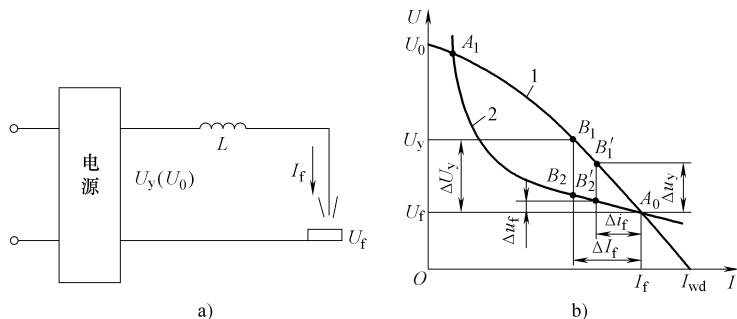


图 1-1-15 “电源-电弧”系统电路示意图及其工作状态图

a) “电源-电弧”系统电路示意图 b) “电源-电弧”系统工作状态图

借助式 (1-1-10) 和图 1-1-15b 进行分析、推导求解, 建立“电源-电弧”系统的稳定条件方程式如下:

$$K_w = \left(\frac{\partial U_f}{\partial I} - \frac{\partial U_y}{\partial I} \right)_{I_f} > 0 \quad (1-1-11)$$

这就是说, 电弧静特性曲线在工作点的斜率必须大于弧焊电源外特性曲线在工作点的斜率。当电弧静特性曲线形状一定时, K_w 值取决于弧焊电源外特性曲线的形状, 只有在 A_0 点才符合 $K_w > 0$ 的条件, 它是稳定工作点。当某种干扰使 A_0 点的电弧电流 I_f 向减小方向偏移 ΔI_f 时, 电源、电弧工作点分别移至 B_1 、 B_2 , 此时弧焊电源电压为: $U_y = U_f + \Delta U_y$ 。 $U_y > U_f$, 供大于求, 使 I_f 增加而减少偏移量 ΔI_f , 直至恢复到原平衡点 A_0 ; 反之亦然。而在 A_1 点 $K_w < 0$, 不是稳定工作点, 原因请读者参照上述方法自行分析。系统自动恢复速度与弧焊电源 U_y 和电弧 U_f 之差及回路 L 有关, K_w 越大, 电感越小, 恢复越快, 稳定性越好。尽管该结论从直流电弧与电源系统得出, 但该稳定条件 ($K_w > 0$) 也适合交流电弧与电源系统。

1.5.2 对外特性曲线形状的要求

弧焊电源外特性曲线形状不仅影响系统的稳定性, 还关系到焊接参数的稳定。在外界干扰使弧长变化时, 将引起系统工作点移动和参数静态偏差。有时某种形状外特性满足系统稳定条件, 却不能保证参数稳定。要同时保证这两个稳定性, 在选配弧焊电源外特性曲线形状时, 需兼顾利于引弧、熔滴过渡等问题。

下面将重点讨论弧焊电源外特性曲线中空载点、工作区和短路区三个重要的特征区段。

1. 对空载电压和稳态短路电流的要求

首先讨论外特性的两个特殊点: 电流为零时的空载电压 U_0 和电压为零时的稳态短路电流 I_{wd} 。

(1) 对 U_0 的要求 如上述可知, U_0 的确定应遵循以下几项原则:

- 1) 保证引弧容易和安全经济性: U_0 越高, 越有利, 但太高不利于安全和经济性。
- 2) 保证电弧的稳定, 交流电弧要求:

$$U_0 \geq (1.8 \sim 2.25) U_f \quad (1-1-12)$$

- 3) 保证电弧功率稳定要求:

$$2.5 > U_0 / U_f > 1.57 \quad (1-1-13)$$

根据国家标准 GB 15579.1—2004, 弧焊电源输入电压为额定值和调节范围。不同工作条件的下降特性 U_0 不允许超过如下规定的安全标准:

弧焊变压器: $U_0 \leq 80$ V (焊条电弧焊交流电源: $U_0 = 50 \sim 70$ V; 埋弧焊交流电源: $U_0 = 70 \sim 90$ V)。

弧焊整流器、弧焊逆变器: $U_0 \leq 85$ V (U_0 直流比交流下限降至 10 V)。

埋弧焊直流电源、弧焊发电机: $U_0 \leq 100$ V (一般 $U_0 = 60 \sim 90$ V)。

一般规定 U_0 不得超过 100 V, 在特殊用途中, 若超过 100 V 时必须备有自动防触电装置。用于熔化极自动、半自动弧焊恒/平特性电源, U_0 较低, 且需按额定焊接电流的大小匹配选择。在特殊条件下, 如在锅炉体内或其他窄小容器内的焊条电弧焊等, U_0 应选得低一些 (如 $U_0 \leq 42$ V), 附加引弧措施, 以防止焊工触电。

(2) 对稳态短路电流的要求 在弧焊电源外特性上, 当 $U_f = 0$ 时对应的电流为稳态短路电流 I_{wd} 如图 1-1-15b 所示。当电弧引燃和熔滴过渡到熔池时, 常发生短路。 I_{wd} 过大, 焊条过热, 药皮易脱落, 熔滴过渡积蓄能量较大而增加飞溅。 I_{wd} 太小, 电磁压缩力、推力不足, 引弧和熔滴过渡困难。对下降特性的弧焊电源要求如下:

$$1.25 < I_{wd} / I_f < 2 \quad (1-1-14)$$

这是弧焊电源利用静特性对动特性进行控制的一种体现。

2. 对外特性曲线工作区段形状的要求

弧焊电源外特性曲线工作区段是指在电弧稳定工作点附近的区段。

(1) 焊条电弧焊 工作于电弧静特性的水平段上，用下降外特性弧焊电源便可满足系统稳定性的要求（交点为 A_0 ），如图 1-1-16 所示。保证参数稳定主要是电流变化大小， K_w 值越大，则电流偏差就越小，电弧越稳定。如果焊工手抖动，电弧特性曲线由弧长 l_1 下降到弧长 l_2 时：弧焊电源恒流特性 3 引起的电流偏差最小（ ΔI_3 ），即参数最稳定，但 I_{wd} 过小，引弧困难，熔滴过渡电弧推力弱、熔深浅。如果使用的焊接参数较小，需在短路前（约 10V 附近）使曲线外拖增大 I_{wd} 。弧焊电源缓降特性 1 和 2 所引起的电流偏差虽比恒流特性大，也能保证参数稳定和电弧弹性，且 $\Delta I_2 > \Delta I_1$ ，特性 1 较好，而特性 2 似乎利于引弧和熔滴过渡，但 I_{wd} 不能太大，以免增加飞溅。通常焊条电弧焊采用缓降特性的弧焊电源或恒流带外拖特性。

(2) 熔化极弧焊 包括埋弧焊、熔化极氩弧焊（MIG 焊）、 CO_2 焊、混合气体保护电弧焊（MAG）等。这些弧焊方法，不仅要根据其电弧静特性的形状，而且还要考虑送丝的方式来选择合适的弧焊电源外特性工作部分的形状。根据送丝方式不同，熔化极弧焊可分为以下两种：

1) 等速送丝控制的熔化极弧焊：包括 CO_2 、MAG、MIG 焊或细丝（直径 $\varphi \leq 3\text{mm}$ ）直流埋弧焊在内，均工作在电弧静特性上升段。弧焊电源外特性为下降、平、微升（上升的陡度需小于电弧静特性上升的陡度）都可满足“电源-电弧”系统 $K_w > 0$ 稳定条件。这些熔化极（焊丝）直径小，电流密度较大，电弧自身调节作用较强。如图 1-1-17 所示，弧焊电源外特性曲线 1 和 2 分别为恒压（平）特性和下降特性，与某一弧长特性曲线 3 稳定工作交叉点为 A_0 ，若外干扰使弧长变短，曲线 3 变短为 4，工作点也由 A_0 各自移至 A_1 和 A_2 ，电流分别增大 ΔI_1 和 ΔI_2 。这势必使焊丝加快熔化，弧长又变长直至恢复到 A_0 。反之亦然。这种使弧长恢复的作用称为“电源-电弧”系统自身调节作用（简称自身调节作用）。 $\Delta I_1 > \Delta I_2$ ，说明恒压比下降特性的自身调节作用更强，易于引弧、有利于防止粘丝，且引起的弧长、 U_f 波动较小（ $\Delta U_{f2} > \Delta U_{f1}$ ）。采用恒压特性弧焊电源较合理。微升外特性电源虽增强自身调节作用，但会引起严重飞溅，只在水下焊等场合采用。

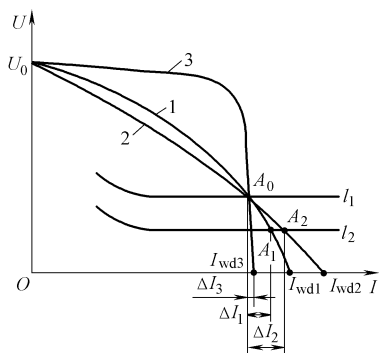


图 1-1-16 不同电源特性弧长变化时引起的电流偏移
1、2—缓降特性 3—恒流特性

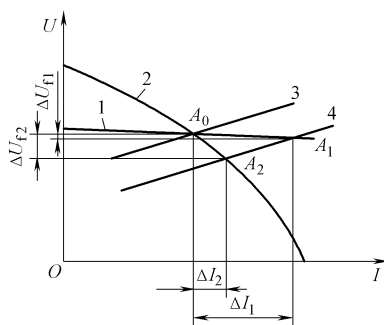


图 1-1-17 电弧特性为上升形状时弧焊电源
外特性对电流偏差的影响

2) 变速送丝控制的熔化极弧焊：通常埋弧焊（焊丝直径大于 3mm）和一部分粗丝 MAG、MIG 焊的电弧静特性是平的。为满足 $K_w > 0$ ，需用下降特性弧焊电源。其焊丝直径较大，电流密度较小，自身调节作用不强，应采用变速控制系统，利用 U_f 作为反馈量来调节送丝速度。当弧长增长时， U_f 增大迫使送丝加快，使弧长得恢复。一般选配较陡的下降特性，弧长变化引起电流偏差较小，有利于焊接参数稳定。

(3) 非熔化极电弧焊 包括 TIG 焊、非熔化极等离子弧焊、脉冲氩弧焊，电弧静特性工作部

分呈平的或略上升形状。它们保证参数稳定（主要是电流），又无需熔滴过渡推力，最好采用恒流特性弧焊电源。

（4）熔化极脉冲电弧焊 一般采用等速送丝，为增强“电源-电弧”系统自身调节作用，维弧、脉冲阶段采用两条平外特性（即“平-平”特性）比较好，也可采用“平-降”特性或“降-平”特性等。如采用变速送丝，需相应选配缓降特性或双阶梯形（□形）特性。它是20多年前出现的一种特性组合，较少使用。

1.6 弧焊工艺对弧焊电源调节性能的要求

1.6.1 弧焊电源的调节性能

弧焊工艺根据被焊工件的材质、厚度与坡口形式等选用不同的焊接参数。而与弧焊电源有关的参数是 U_f 和 I_f 。为满足所需不同 U_f 和 I_f 及其合理匹配，弧焊电源需具备可调节性能，以获得足够宽的焊接范围。

如前所述，电弧 U_f 和 I_f 是由电弧静特性（即规定负载特性）和弧焊电源外特性曲线相交的一个稳定工作点决定的。对应于一定的弧长，只有一个稳定点。为了获得一定范围所需的 U_f 和 I_f ，弧焊电源外特性必须可均匀调节，以便获得一系列稳定工作点，如图1-1-18a、b所示。

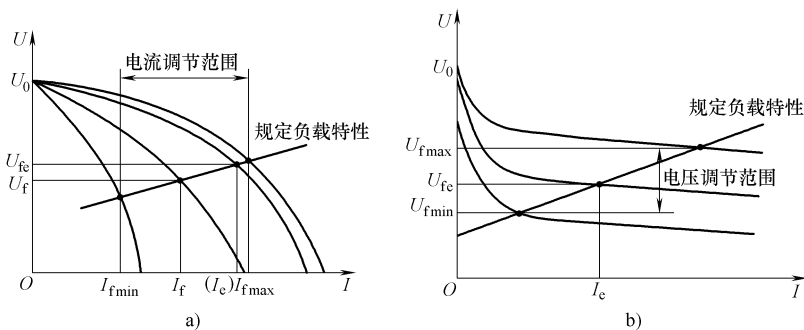


图 1-1-18 改变等效阻抗时的外特性

a) 下降外特性 b) 平外特性

根据图1-1-18a，在稳定工作条件下， I_f 和 U_f 、 U_0 和等效阻抗 Z 之间的关系，如式（1-1-15）所示：

$$\dot{U}_f = \dot{U}_0 - \dot{I}_f Z \quad (1-1-15a)$$

或者

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{U}_0 - \dot{U}_f}{Z} \quad (1-1-15b)$$

调节焊接参数，即在给定 I_f 时调节 U_f ，如式（1-1-15a）所示，可通过调节 U_0 和 Z 来实现；或给定 U_f 调节 I_f ，如式（1-1-15b）所示，也可通过调节 U_0 和 Z 来实现。当 U_0 不变，改变 Z 时，便可得到一簇下降特性曲线，如图1-1-18a所示。当 Z 不变，改变 U_0 可得一簇上下平移的平特性曲线，如图1-1-18b所示。上述三种调节方式所表示的调节性能不同。若能保证在所需宽度范围内均匀而方便地调节参数，并能满足保证电弧稳定、焊缝成形好等工艺要求，就认为调节性能良好。不同焊接方法选用不同的外特性调节方式。

应指出， Z 是弧焊电源的等效阻抗，在电子控制的弧焊电源中将被导通角、占空比、频率变化

来取代。

1. 焊条电弧焊选用的调节性能

这种焊接方法主要焊接参数是焊接电流 I_f ，它的调节范围不大，即使 U_f 不变，也能保证得到所要求的焊缝成形。焊接不同厚度的工件时，只调节焊接电流，常用调节外特性方式如图 1-1-18a 所示。一般要求 $U_0 = (1.8 \sim 2.25) U_f$ ， U_0 一般不必调节。在交流小电流焊接时，也可用较高 U_0 。在大电流焊时， U_0 可降低。

2. 埋弧焊选用的调节性能

在埋弧焊中， I_f 增加使熔深随着增大，要求增大 U_f 使熔宽相应增加，保持合适的焊缝几何尺寸。有的也采用在 U_f 增大时相应提高 U_0 ，以使电弧更稳定。如选用缓降特性，要求配以变速送丝和电弧电压负反馈，自动调节弧长和 U_f 。另外，通过改变缓降特性工作曲线段的斜率或位置来调节 I_f 。

3. 等速送丝气体保护电弧焊选用的调节性能

这种电弧静特性为上升的熔化极气体保护焊（含焊丝直径小于 3mm 的埋弧焊），可选用平外特性和等速送丝控制。外特性调节方式如图 1-1-18b 所示。为使焊缝成形系数合理和均匀， U_f 应随 I_f 增减而增减，有的也采用 U_0 随 I_f 、 U_f 增减而增减，有利于提高功率因数。

1.6.2 弧焊电源的可调焊接参数

1. 下降特性的可调焊接参数

下降特性弧焊电源的可调焊接参数如图 1-1-18a 所示。

(1) 工作电流 I_f 输出的焊接电流。

(2) 工作电压 U_f 输出的电弧电压。这时负载不仅包括电弧，还包括焊接回路电缆等。随着 I_f 增大，电缆上压降也增大。为保证一定的 U_f ，要求 U_f 随 I_f 增大而增大。根据生产经验规定 U_f 与 I_f 的关系为一缓升直线，把它作为规定负载特性，以便确定弧焊电源的 I_f 或 U_f 调节范围。在国家标准中规定不同焊接和切割方法的负载特性如下。

1) 焊条电弧焊和埋弧焊的负载特性。

当 $I_f \leq 600\text{A}$ 时， $U_f = (20 + 0.04I_f)\text{V}$ ；

当 $I_f > 600\text{A}$ 时， $U_f = 44\text{V}$ 。

2) TIG 焊和等离子弧焊的负载特性。

当 $I_f \leq 600\text{A}$ 时， $U_f = (10 + 0.04I_f)\text{V}$ ；

当 $I_f > 600\text{A}$ 时， $U_f = 34\text{V}$ 。

3) 等离子弧切割的负载特性。

当 $I_f \leq 300\text{A}$ 时， $U_f = (80 + 0.4I_f)\text{V}$ ；

当 $I_f > 300\text{A}$ 时， $U_f = 220\text{V}$ 。

4) 等离子弧气刨的负载特性。

当 $I_f \leq 300\text{A}$ 时， $U_f = (100 + 0.4I_f)\text{V}$ ；

当 $I_f > 300\text{A}$ 时， $U_f = 220\text{V}$ 。

(3) 最大焊接电流 $I_{f\max}$ 通过调节所能输出的与负载特性相应的上限电流。

(4) 最小焊接电流 $I_{f\min}$ 通过调节所能输出的与负载特性相应的最小电流。

(5) 电流调节范围 在规定负载特性条件下，通过调节所能获得的焊接电流范围。通常要求如下：

$I_{f\max}/I_e \geq 1.0$ ， $I_{f\min}/I_e \leq 0.20$ （TIG 焊要求 $I_{f\min}/I_e \leq 0.10$ ）。其中， I_e 为额定焊接电流。

2. 平降特性的可调焊接参数

平特性弧焊电源的可调参数，如图 1-1-18b 所示。

(1) 工作电流 I_f 与下降特性的焊接电流 I_f 相同。在等速送丝 MIG/MAG/CO₂ 焊时, I_f 主要由送丝速度决定, 与电压无关。

(2) 工作电压 U_f 同于下降特性的电弧电压 U_f 。要求它随着 I_f 增大而增大, 等速送丝 MIG/MAG/CO₂ 焊和药芯焊丝自保护电弧焊时规定的负载特性如下:

当 $I_f \leq 600\text{A}$ 时, $U_f = (14 + 0.05I_f) \text{ V}$;

当 $I_f > 600\text{A}$ 时, $U_f = 44\text{V}$ 。

(3) 最大工作电压 $U_{f\max}$ 通过调节所能输出的, 与规定负载特性相对应的最大电压。

(4) 最小工作电压 $U_{f\min}$ 通过调节所能输出的, 与规定负载特性相对应的最小电压。

(5) 工作电压调节范围 在规定负载条件下, 经调节而获得的工作电压范围。

1.6.3 弧焊电源的负载持续率和额定参数

弧焊电源能输出多大功率, 与温升密切相关, 温升过高, 绝缘可能破坏, 甚至烧毁元器件。对不同绝缘级别规定了相应允许温升。弧焊电源的温升除取决于电流大小外, 还决定于是长时间连续通电还是间歇通电。同一容量电源在断续焊时, 允许使用电流大些, 可用负载持续率 FS 来表示负荷状态:

$$FS = \frac{\text{负载持续运行时间}}{\text{负载持续运行时间} + \text{休止时间}} \times 100\% = \frac{t}{T} \times 100\% \quad (1-1-16)$$

式中 T ——弧焊电源的工作周期 (一个周期 10min), 它是负载持续运行时间与休止时间之和。

负载持续率额定级原规定有 15%、25%、40%、60%、80% 和 100% 六种。国家标准曾规定为 35%、60% 和 100% 三种。焊条电弧焊电源一般为 60%。自动或半自动弧焊电源 100% 或 60%。按新标准, 各制造厂家可根据市场和产品特点与销售策略, 自行设定负载持续率。

弧焊电源铭牌上的额定电流 I_e , 是额定负载持续率 FS_e 和标准规定的温升限度下所允许输出的电流值。与 I_e 对应的电压为额定工作电压 U_{fe} 。不同负载持续率 FS , 所允许使用 I_f 不同。 FS 、 I_f 与额定值 FS_e 、 I_e 的关系如式 (1-1-17) 所示:

$$I_f = \sqrt{\frac{FS_e}{FS}} I_e \quad (1-1-17)$$

1.7 弧焊工艺对弧焊电源动特性的要求

1.7.1 电弧焊熔滴过渡与弧焊电源动特性的概念

1. 熔化极电弧焊熔滴过渡基本形式

熔化极电弧焊的焊条或焊丝被加热形成金属熔滴进入熔池的过程, 称为熔滴过渡。弧焊工艺方法和焊接参数不同, 熔滴过渡有射流过渡、滴状过渡和短路过渡三种基本形式, 其动负载的变化情况也各有所异。图 1-1-19a、b 所示分别为以细颗粒高速进入熔池的射流过渡和以自由飞落方式进入熔池的滴状过渡。除滴状过渡偶尔有大熔滴短路外, 这两种情况的 u_f 电弧电压和 i_f 基本不变, 可把电弧看成静态负载, 对弧焊电源的动特性没有特殊要求。短路过渡则不然, 电弧是常发生较大变化的动负载, 弧焊电源常在“空载、负载、短路”三种状态之间转换, 需对弧焊电源的动特性提出要求。

2. 弧焊电源动特性的概念

弧焊电源的动特性是指电弧负载状态发生突然变化时, 弧焊电源输出电压、电流对时间的响应过程。其关系式为: $u_f = f(t)$; $i_f = f(t)$ 。它们表示对负载瞬变的适应能力, 只有动特性合适, 才

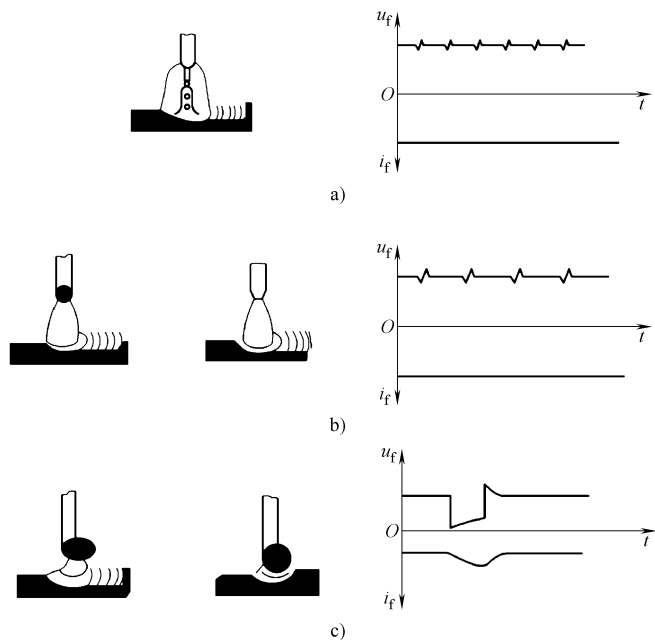


图 1-1-19 熔滴过渡形式及其电压、电流波形图
a) 射流过渡 b) 滴状过渡 c) 短路过渡

能获得良好的引弧、燃弧和熔滴过渡状态，飞溅少，焊缝质量良好。这对常出现短路过渡的焊条电弧焊和细丝 CO₂ 焊来说是特别重要的。

1.7.2 焊条电弧焊熔滴过渡及其对弧焊电源特性的要求

1. 焊条电弧焊熔滴过渡特点

焊条电弧焊采用短路引弧和过渡时，电流和电压的变化曲线如图 1-1-20 所示。首先使焊条与工件短路，电压迅速下降至短路电压 U_d ，电流迅速增至最大值 I_{sd} ，然后又逐渐下降到稳定短路电流 I_{wd} 。待焊条离开工件之后，电压迅速上升，出现燃弧过程。当熔滴把焊条与熔池短路时，电弧瞬时熄灭，电压下降，电流又增至短路电流峰值 I_{sd} ，此时熔滴在重力和电磁压缩力作用下，短路过渡进入熔池。熔滴脱落后又进入重新引燃阶段。如此周而复始， U_f 和 I_f 周期性变化。可概括成“空载—短路—负载”引弧过程和“负载—短路—负载”熔滴过渡过程。

2. 焊条电弧焊工艺对电源动特性的要求

如上所述，当弧焊回路突然短路时，就会出现短路电流峰值，主要需考虑“由空载到短路”和“由负载到短路”两种情况及其考核指标要求，推荐参考值见表 1-1-1。

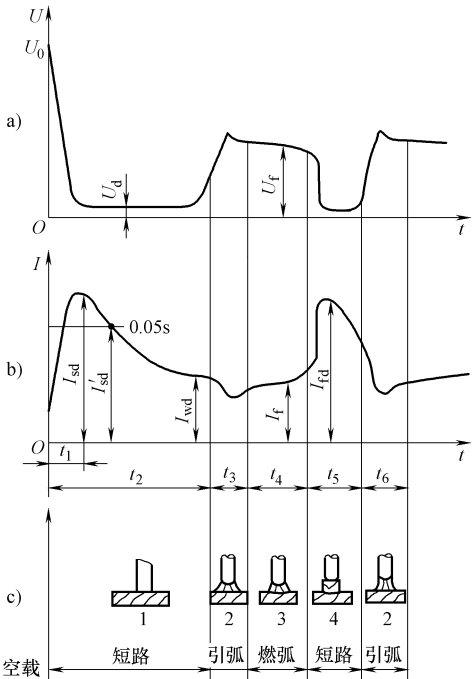


图 1-1-20 焊条电弧焊电流和电压变化曲线图
 I_{sd} —由空载至短路瞬时电流峰值
 I_{fd} —由负载至短路瞬时电流峰值
 I'_{sd} —经 0.05s 后瞬时短路电流
 I_{wd} —稳定短路电流 U_d —短路电压 U_f —电弧电压

表 1-1-1 弧焊整流器动特性指标

项 目		整 流 器		指 标
		电 流/A	电 压/V	
空载至短路	I_{sd}/I_f	额定值	$U_f = 20 + 0.04I_f$	≤ 3
		20% 额定值		≤ 5.5
	0.05s 瞬时短路至稳态短路 I'_{sd}/I_{wd}			≤ 1.5
负载至短路	I_{fd}/I_f	额定值		≤ 2.5
		20% 额定值		≤ 3

(1) 由空载到短路 要求 I_{sd} 大小要适合。

1) 瞬时短路电流峰值 I_{sd} 影响引弧: I_{sd} 太小, 不利于热发射和热电离, 引弧困难; 若太大, 飞溅大甚至工件烧穿。指标要求 I_{sd}/I_{wd} 控制在一定值。

2) 0.05s 瞬时短路电流值 I'_{sd} 大, 峰值下降慢, 冲击能量大, 飞溅也大。它仅出现于短路电流过冲时间较长的硅弧焊整流器中, 需适当注意控制 I'_{sd}/I_{wd} , 但实际意义不大, 一般不作为规定指标考核。

(2) 由负载到短路的短路电流 I_{fd} 影响熔滴过渡, I_{fd} 太大, 熔滴飞溅严重, 焊缝成形变坏, 甚至焊件烧穿、电弧不稳。 I_{fd} 过小, 功率不够, 熔滴过渡困难。通常以 I_{fd}/I_f 之比来衡量。

此外, 用直流弧焊发电机进行焊条电弧焊短路引弧时, 焊条被拉开后因弧焊回路内电感影响, 由短路到空载过程不能瞬间就恢复到 U_0 , 而是先出现一个尖峰值 (约 0.05s), 再下降到恢复电压最低值 U_{min} , 然后逐渐升高至 U_0 。 U_{min} 太小, 熔滴过渡后电弧复燃困难。其他类型的弧焊电源不存在此问题, 无需考核。

1.7.3 细丝 CO₂ 焊熔滴过渡及其对弧焊电源特性的要求

1. 细丝 CO₂ 焊短路熔滴过渡的特点

细丝 CO₂ 焊典型熔滴短路过渡过程的电流和电压变化曲线如图 1-1-21 所示。电弧引燃后焊丝端部形成熔滴, 并逐渐增大, 直至电弧间隙短路。电弧熄灭, 电压急降, 短路电流突增。熔滴在电磁压缩力下形成缩颈, 向熔池过渡。熔滴脱落后弧隙的电压急增到超过稳定电压, 重新引弧。以后重复整个循环。弧焊电源工作在“空载、短路、负载”周期性变换的响应过程, 且速度、频率更高, 所形成的曲线就是弧焊电源的动特性。不同弧焊电源对电弧动载的响应过程不相同。我们需要了解弧焊电源动特性对焊接过程的影响, 进而从保证引弧、燃弧、熔滴过渡能处于良好状态的客观要求出发, 对弧焊电源动特性提出若干参考性的指标, 用以指导设计制造和评价工作。

2. 细丝 CO₂ 焊工艺对弧焊电源动特性的要求

对细丝 CO₂ 焊电源动特性指标无明确规定。它的主要要求包括短路电流增长速度和短路电流峰值。

(1) 从负载到短路电流增长速度 di_{fd}/dt 它是影响熔滴过渡的主要参数。 di_{fd}/dt 小, 过渡频率低, 熔滴过渡小桥难以断开, 短路延长以致焊丝成段爆断、大颗粒飞溅, 难以复燃, 甚至焊丝插入熔池与工件短路灭弧。

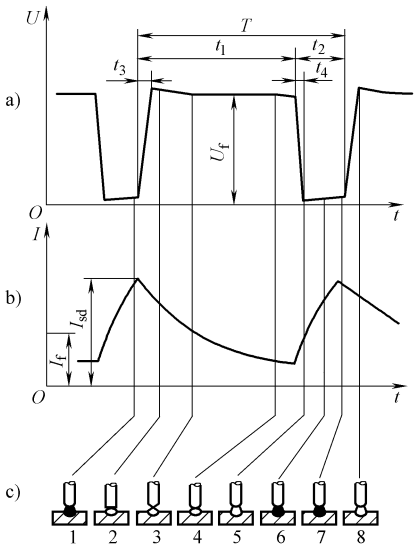


图 1-1-21 CO₂ 焊短路过渡过程的电流和电压变化曲线图
T—周期 t_1 —电弧燃烧时间
 t_2 —短路电流峰值期 t_3 —电压恢复时间
 I_f —平均焊接电流 U_f —电弧电压

di_{fd}/dt 过大, 大量小颗粒飞溅, 成形不好, 金属烧损多。不同直径的焊丝所适合的短路电流增长速度不一样, 推荐参考值见表 1-1-2。短路电流峰值对熔滴过渡的影响前面已分析, 不再重复。

(2) 空载电压恢复速度 当短路结束后, 需立即引燃电弧, 以免中断焊接过程, 要求弧焊电源要有足够快的空载电压恢复速度。一般平特性弧焊整流器不难实现。

表 1-1-2 短路电流增长速度推荐参考值

焊丝直径/mm	0.8	1.2	1.6
短路电流增长速度/(kA/s)	50 ~ 150	40 ~ 130	20 ~ 75

参 考 文 献

[1] 黄石生. 弧焊电源 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.

[2] 赵熹华. 焊接方法与机电一体化 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

[3] 上海交通大学. 电弧物理 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1980.

[4] 黄石生. 弧焊电源及其数字化控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[5] 西安交通大学. 熔化电焊 [M]. 北京: 中国工业出版社, 1961.

[6] 黄石生. 电子控制的弧焊电源 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.

[7] 杨春利, 林三宝. 电弧焊基础 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.

第2章 弧焊电源

弧焊电源（arc welding power supply）是焊接电弧的供电者。本章首先研究弧焊电源概念、基本原理、分类和新发展，再以弧焊逆变器为重点，介绍弧焊变压器、弧焊发电机、硅弧焊整流器、晶闸管弧焊整流器和弧焊电源的数字化控制等技术，如何满足焊接电弧及其工艺方法对它们的外特性、调节特性和动特性三项基本要求，进而简单介绍其合理选用及安装等。

2.1 弧焊电源概述

2.1.1 弧焊电源的概念、分类及其特点

1. 弧焊电源概念

弧焊电源是电弧焊机的核心部分，是对焊接电弧提供电能的一种装置。它与焊枪等辅助设备、附件配套成为电弧焊机、电弧焊设备。它必须具备焊接电弧及其工艺所要求的基本电特性。

显然，没有性能良好的弧焊电源，要保证电弧的引燃、稳定燃烧和焊接质量是不可能的。只有对它的基本理论和电特性进行深入研究，才能真正了解和正确使用，进而创造出新型的弧焊电源。

2. 分类和结构特点与应用

(1) 按输出电流分类 可分为交流弧焊电源、直流弧焊电源、脉冲弧焊电源。

(2) 按控制技术分类 可分为如下4类。

1) 机械式控制：用机械装置控制外、动特性。如动铁心式、动线圈式、抽头式弧焊变压器、整流器。其结构简单，工作可靠，用于要求不高的酸性焊条的焊条电弧焊。

2) 电磁式控制：用电磁控制外、动特性。如串联饱和电抗器式弧焊变压器、磁放大器式弧焊整流器和弧焊发电机等。其工作可靠，笨重耗材、耗电大，动特性欠佳。用于要求不高的焊条电弧焊和钨极氩弧焊。

3) 电子式控制：用电子技术控制外、动特性。如晶闸管、晶体管式弧焊整流器、弧焊逆变器。其控制性能、动特性好，便于实现自动化，特别是弧焊逆变器节电、省材，越来越多应用。用于中高档电弧焊工艺。

4) 数字式控制：用数字化技术控制外、动特性。如单片机、PLC/PLD、ARM、DSP 等控制。抗干扰性能好，控制精度高，便于多参数优化匹配，建立数据库。用于高精密、高性能、自动化焊。但成本较高。

目前应用较多的弧焊电源有弧焊变压器、晶闸管式弧焊整流器、IGBT 式、场效应晶体管式弧焊逆变器、硅弧焊整流器、弧焊电源的数字化控制等。

2.1.2 弧焊电源的基本原理和特点

最常用的弧焊电源有机械式控制和电子式控制弧焊电源。电磁式控制越来越少用，暂不介绍。机械式控制的基本原理如图 1-1-15a 和式 (1-1-15) 所示，不再重复。这里主要介绍电子、数字控制弧焊电源。如图 1-2-1 所示，主电路以电子功率系统为主体，与供电系统、焊接电弧组成。控制电路以电子控制系统为主体，与输出信号检测 M、给定 G、比较放大 N 等电路共同组成。

任何一种电子控制式弧焊电源都具有电子功率系统和电子控制系统两个核心部分。

电子功率系统的任务是借助于电子控制系统的配合,把微弱电控信号放大,向焊接电弧提供电能。它的质量是弧焊电源可靠性和性能好坏的决定性因素之一。从基本原理上,可把它看成音响设备的末级功率放大器。其质量越好,输出的功率信号与控制信号越接近,工作性能越好。从调节意义来说,要求它应有最高反应速度,可把它归纳成三种基本形式:模拟控制型功率系统(如模拟型晶体管式弧焊电源),其反应时间最短($30 \sim 50 \mu\text{s}$);二次侧分频型功率系统(开关型晶体管、晶闸管式弧焊电源);一次侧分频(开关)型弧焊电源(即各类弧焊逆变器)。后两种的反应时间较长($300 \sim 500 \mu\text{s}$)。

电子控制系统的任务是与电子功率系统配合,控制调节静、动特性以及焊接参数、波形和时序。它的质量也是弧焊电源性能好坏的决定性因素之一。

给定电路给出一个可调的给定电压(标准电压)或一个对应于特定变量函数(脉冲信号)。检测电路的负反馈信号,既可正比于输出电流,通过比较放大,获得恒流特性;也可正比于输出电压,获得恒压特性;或者两种负反馈信号按适当比例联合,获得任意形状外特性。

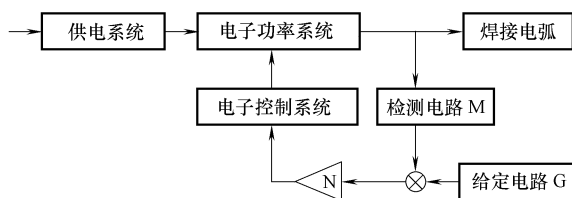


图 1-2-1 电子控制式弧焊电源基本原理框图

2.1.3 弧焊电源的新发展

弧焊电源的发展与现代工业技术和科学的进步密切相关。它随着电力电子、微电子、功率电子技术及其元件的发展而不断推向新阶段:以功率变频逆变和数字化核心技术为时代特征,向着节能省材、少飞溅、低污染、大功率、数字化、高精度、模块化和智能化、高速焊等技术发展。具体表现如下:

(1) IGBT 式弧焊逆变器逐步发展为主导技术 它节能省材,经历了晶闸管式→晶体管式→场效应管式→IGBT 式和从硬开关到软开关等历程,正在起着更新换代的主导作用。

(2) 数字化的控制技术向纵深发展 从单片机控制→ARM 控制→DSP 控制→智能控制。对静、动态特性与多参数变换、优化匹配及输出波形等,进行任意控制和调节储存,一机多功能,具有专家数据库等。

(3) 少飞溅、低污染和高精度技术 对短路熔滴过渡电流波形控制,少飞溅、低污染,开发双脉冲、交流脉冲,高精度控制对熔池的热输入,扩大稳定的调节范围,改善焊缝成形与质量,还可焊接镁合金等。

(4) 多台弧焊电源组合工作及其协同控制技术 以大功率逆变式直流和方波交流组合弧焊电源为核心技术,实现双丝、多丝(多达十丝)高速高效 MIG/MAG/脉冲焊/埋弧焊新工艺。

2.2 弧焊变压器的原理及其特点

弧焊变压器是一种特殊降压变压器,其基本原理与一般电力变压器相同,但为满足焊接电弧和工艺要求而有其特点:为顺利引弧、稳弧,要有一定的空载电压和较大电感;用于焊条电弧焊、埋弧焊和钨极氩弧焊,应具有下降外特性;为了调节电弧电流、电压,应有均匀的调节性能。

2.2.1 弧焊变压器的基本原理及分类

为便于研究基本原理,以串联电抗器式弧焊变压器典型结构为例,图 1-2-2 所示为其电路结构

示意和等效电路图。与普通变压器一样,通过基本方程式、等效电路,分析空载电压建立方程式,获得下降特性和调节性能原理。根据变压器基础知识,图 1-2-2b、c 分别为未简化和已简化电路,可建立弧焊变压器的电压矢量平衡方程式(外特性方程式):

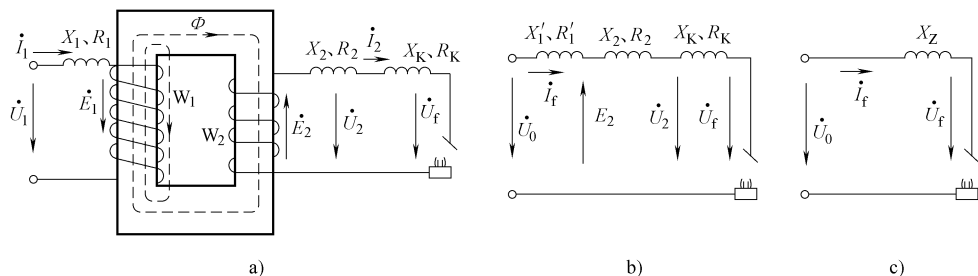


图 1-2-2 串联电抗器式结构电路示意和等效电路图

a) 串联电抗器式结构示意图 b) 未简化等效电路 c) 已简化等效电路

$$\dot{U}_f = \dot{U}_0 - j\dot{I}_2(X'_1 + X_2 + X_K) - \dot{I}_2(R'_1 + R_2 + R_K) \quad (1-2-1)$$

式中的一次电阻 R_1 、漏抗 X_1 折算到二次电路等效值 R'_1 、 X'_1 ; 令一、二次漏抗为: $X'_1 + X_2 = X_L$ (总漏抗); 电抗器感抗为 X_K ; 而一、二次电阻 R'_1 、 R_2 和电抗电阻 R_K 值较小可忽略, 且二次电流 $I_2 = I_f$ (I_f 为负载电流或电弧电流), 则有

$$\dot{U}_f = \dot{U}_0 - j\dot{I}_f(X_L + X_K) \quad (1-2-2)$$

令 $X_L + X_K = X_Z$ (总电抗), 于是外特性方程式为

$$\dot{U}_f = \dot{U}_0 - j\dot{I}_f X_Z \quad (1-2-3)$$

外特性方程式也可写成以下形式:

$$\dot{I}_f = \frac{\sqrt{\dot{U}_0^2 - \dot{U}_f^2}}{X_L + X_K} \quad (1-2-4)$$

由上述分析, 可归纳各类弧焊变压器获得电特性基本原理如下:

(1) 空载电压 U_0 当 $I_f = 0$, $U_f = U_0$ 时, 有以下情况:

1) 当无漏磁时, 一、二次绕组 W_1 、 W_2 紧密耦合, W_1 、 W_2 的匝数分别为 N_1 、 N_2 , 系数 $K_M = 1$, 则

$$\dot{U}_0 = \frac{N_2}{N_1} \dot{U}_1 \quad (1-2-5)$$

2) 当有漏磁时, 系数 $K_M < 1$, 则

$$\dot{U}_0 = \frac{N_2}{N_1} K_M \dot{U}_1 \quad (1-2-6)$$

(2) 稳态短路电流 I_{wd} $U_f = 0$, $I_f = I_{wd}$, 由电抗 X_K 或漏抗 X_L 或总电抗 X_Z 限制 I_{wd} , 即: $I_{wd} = U_0 / X_Z$ 。

(3) 外特性和调节性能 空载电压和稳态短路电流是外特性的两个特殊点。弧焊变压器靠电抗 X_K 或漏抗 X_L 或总电抗 X_Z 改变大小等都可获下降特性及调节电流, 而电抗、漏抗又是因人为地改变铁芯、一次绕组、二次绕组的结构及其分布、耦合而异, 从而形成串联电抗器式、增强漏磁式两类弧焊变压器。研究各类弧焊变压器的结构与原理, 实际上是研究它们各自总电抗 X_Z 怎样产生和所包括的电抗 X_K 或漏抗 X_L 的情况及其大小的影响。

2.2.2 串联电抗器式弧焊变压器

串联电抗器式弧焊变压器由变压器和电抗器组成。前者为正常漏磁平特性的变压器, 将网路电

压降至所要求的空载电压。为了得到下降特性及调节电流需串联电抗器。以变压器与电抗器的结构关系,可分为分体式和同体式两种。

1. 分体式弧焊变压器

分体式弧焊变压器由变压器和电抗器两种独立部件组成,只是把两者串联使用,可分为单站式和多站式两种。

(1) 单站分体式弧焊变压器 只供单个焊工使用。

1) 结构特点:如图 1-2-3a 所示,由变压器 T 和电抗器 L 组成。一次绕组 1 和二次绕组 2 共同绕在两侧心柱。一次绕组和二次绕组之间磁耦合紧密。L 为电抗器,装有传动机构手柄 3,可调气隙大小。

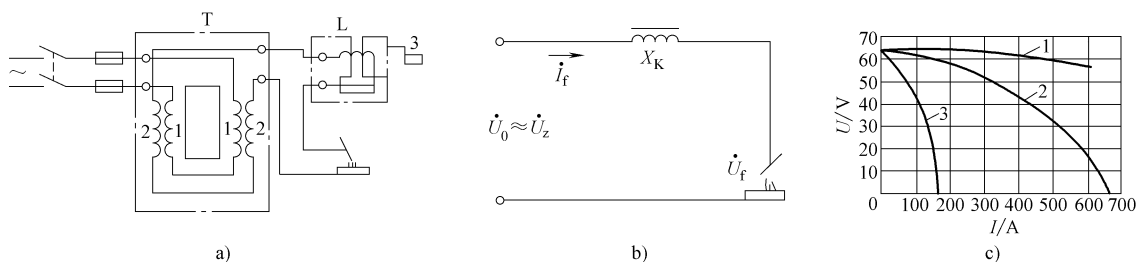


图 1-2-3 分体式结构示意图及其负载时的等效电路和外特性曲线

a) 分体式结构示意图 b) 等效电路 c) 外特性

2) 工作原理:漏抗 X_L , 耦合系数 $K_M = 1$, U_0 见式 (1-2-5); $X_Z = X_K$, 即靠串联电抗器 X_K 获得下降特性、调节电流和限制稳态短路电流 I_{wd} , 负载时的等效电路和外特性曲线分别如图 1-2-3b、c 所示。 X_K 与结构及其参数关系为

$$X_K = \omega \mu_0 \frac{N_K^2 S_\delta}{\delta} \quad (1-2-7)$$

式中的空气磁导率 μ_0 、气隙截面积 S_δ 和角频率 ω 均为常数。由式 (1-2-7) 和式 (1-2-4) 可知:通过调节气隙 δ 来调电流。当 δ 减小,使 X_K 增大,从而 I_f 减小,外特性从图 1-2-3c 中曲线 2 均匀改变至 3。优点:变压器和电抗器可分别使用,易搬动。缺点:小电流稳定性差,耗材较多,已不生产,以生产多站分体式为主。

(2) 多站分体式弧焊变压器 供多个焊工使用。

1) 结构特点:在造船、锅炉等焊接车间,生产任务繁重,往往采用多站式弧焊变压器集中供电。其本身必是平特性,各站各自串联电抗器获得下降特性,独立调节焊接电流。其供电电路如图 1-2-4 所示。为确保各焊接站之间互不影响,要求电流自零增至额定值时,输出端电压降低不超过空载电压的 3% ~ 5%。

多站集中供电方式可提高设备利用率。多站式电源所能供应站数的计算式如下:

$$n = I_{de} / K I_{me} \quad (1-2-8)$$

式中 n ——可供站数;

I_{de} ——多站电源的额定电流;

I_{me} ——每站所需额定电流;

K ——同时利用系数(一般可取 0.6)。

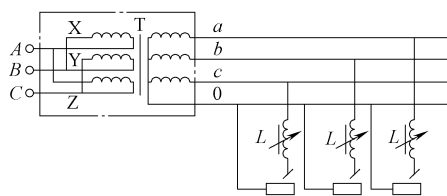


图 1-2-4 多站式供电方式电路图

2) 产品介绍: 国产 BP—3×500 型。由一台正常漏磁的三相降压变压器和 12 个调节气隙式电抗器组成, 可供 12 个焊接站用。优点: 节省投资, 提高设备利用率, 便于管理、维护, 减少供面积。缺点: 线路能量损失大, 移动不便。

2. 同体式弧焊变压器

(1) 结构特点 如图 1-2-5 所示, 下部是变压器, 上部是电抗器, 各自结构与分体式弧焊变压器相同。为便于作图, 一、二次绕组画成上下叠绕, 实为同轴缠绕, 一、二次绕组分别在内、外层。与分体式弧焊变压器不同: 将电抗器叠于变压器之上共用中间磁轭, 以便节省材料。

(2) 工作原理

1) 空载: 由于共用磁轭变压器与电抗器有磁的联系, W_K 也参与建立空载电压。但份额很小影响不大。

2) 负载: 一般把 N_2 与 W_K 反向连接。它获得电特性的原理与分体式靠电抗 W_2 的相同, 且比其结构更紧凑、省料, 但笨重些。因小电流时电弧不够稳定, 宜做成大、中容量, 作为焊条电弧焊、埋弧焊电源。

3) 产品介绍: 有 BX 和 BX2 两个系列: BX—500 型; BX2—500、BX2—700、BX2—1000、BX2—2000 型。

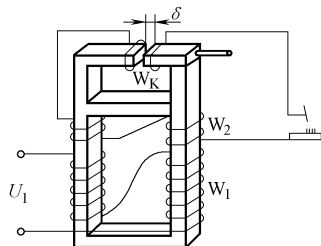


图 1-2-5 同体式结构示意图

2.2.3 增强漏磁式弧焊变压器

根据漏磁方式不同, 可分为动铁心式、动线圈式弧焊变压器。

1. 动铁心式弧焊变压器

(1) 结构特点 其结构如图 1-2-6a 所示, W_1 和 W_2 耦合不紧密以增漏磁, 各自分开绕在变压器铁心 I 上, 二者之间相距 δ_{12} , 且在 W_1 、 W_2 之间设有铁心 II, 构成磁分路, 增强漏磁。铁心 II 可移动, 进出于铁心 I 的窗口调节漏磁, 故称为动铁心式。

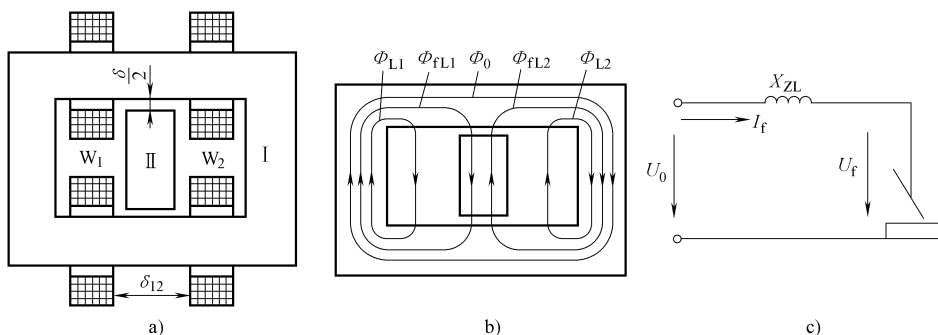


图 1-2-6 动铁心式结构及其负载时磁通分布和等效电路

a) 动铁心式结构 b) 负载时磁通分布 c) 等效电路

(2) 工作原理 较大的自漏抗 X_L (X_{L1} 、 X_{L2}) 和附加漏抗 X_{fL} (X_{fL1} 、 X_{fL2})。空载电压 U_0 由 Φ_0 穿过 W_2 感应建立, 即 $K_M < 1$, U_0 见式 (1-2-6)。 $X_K = 0$, 总漏抗为 $X_Z = X_{ZL} = X_L + X_{fL}$, 即通过总漏抗 X_Z (X_{ZL}) 获得电特性。负载等效电路和外特性曲线分别如图 1-2-6b、c 所示。通过移动动铁心改变总漏抗 X_{ZL} , 可调节 I_f 。 X_L 与动铁心位置无关, 只需调节 X_{fL} 。

$$X_{\text{IL}} \propto \mu_0 \omega \frac{N_2^2 S_{\delta}}{\delta} \quad (1-2-9)$$

式中 μ_0 ——空气的磁导率常数；

δ ——变压器铁心与动铁心之间的气隙长度；

S_{δ} ——变压器铁心与动铁心之间气隙的截面积。

动铁心形状有矩形和梯形两种，如图 1-2-7a、b 所示。它们所需调节的参数有所不同。

1) 矩形动铁心：移动时不变 δ ， S_{δ} 减小使 X_{IL} 减小， K_{M} 增大，使 U_0 、 I_{f} 增大，外特性曲线往右移，调节范围如图 1-2-7c 实线所示。只改变动铁心位置，电流调节范围不够宽，需二次绕组换挡粗调，浪费材料。国内已停产矩形动铁心。

2) 梯形动铁心：动铁心位置不同，不仅 S_{δ} 改变且 δ 也跟着改变， X_{IL} 最大值和最小值时分别比矩形动铁心大和小，电流、外特性调节范围较大，如图 1-2-7c 虚线所示，不必设粗调。它在我国和日本等国家已广为应用。

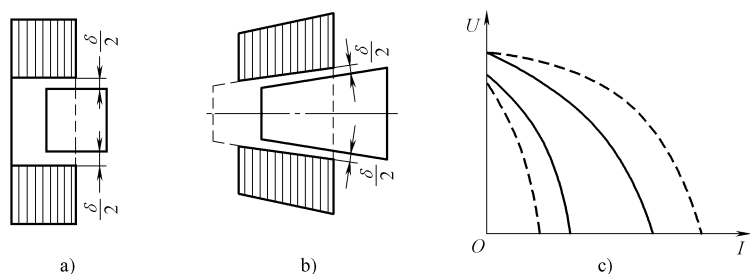


图 1-2-7 动铁心形状及其外特性曲线图

a) 矩形动铁心 b) 梯形动铁心 c) 外特性曲线

2. 动线圈式弧焊变压器

(1) 结构特点 如图 1-2-8a、b 所示，铁心高而窄，在两侧心柱上套有各自分开缠绕的 W_1 、 W_2 。 W_1 在下方固定； W_2 在上方可活动，摇动手柄可令其沿铁心柱上下移动，改变 W_1 与 W_2 间距 δ_{12} ，可细调参数。

(2) 工作原理 W_1 、 W_2 之间距离大、磁耦合不紧密，没有经动铁闭合的附加漏磁，仅靠强漏磁、总漏抗 X_{ZL} (X_{L1} 与 X_{L2}) 获得电特性。

总漏抗 X_{ZL} 为

$$X_{\text{ZL}} = KN_2^2 (\delta_{12} + A) \quad (1-2-10)$$

式中 K 、 A ——与变压器结构有关的常数。

可见，改变 N_2^2 和 δ_{12} 可分别有级粗调和均匀细调，外特性和调节范围较宽，如图 1-2-8c 所示。

(3) 产品介绍 其优点为没有活动铁心，避免铁心振动引起的小电流电弧不稳，且当调至小电流时， δ_{12} 最大，电磁力更小，故电弧稳定。缺点：调节下限受铁心高度限制，只适用于中等容量。国产产品有以下型号：用于焊条电弧焊的 BX3—120、BX3—300、BX3—500 型；空载电压略高，可用于氩弧焊的 BX3—1—300、BX3—1—500 型。

3. 抽头式弧焊变压器

它的结构及磁通分布如图 1-2-9a 所示。在心柱 I 上绕有一次绕组的一部分 W_{II} ；在心柱 II 上绕有一次绕组的另一部分 W_{III} 和二次绕组 W_2 。 W_{III} 和 W_2 同轴缠绕，其间的漏磁可略去。而 W_2 与 W_{II} 则分别绕在不同的心柱上，彼此间有较大漏磁。靠强漏磁、总漏抗 X_{ZL} 获得电特性。总漏抗 X_{ZL} 为

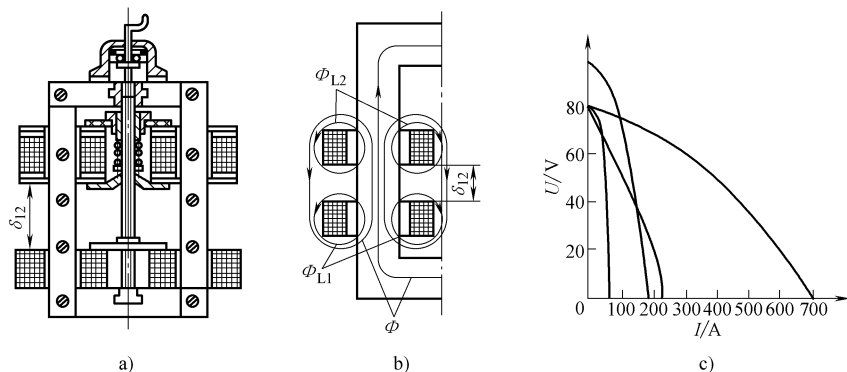


图 1-2-8 动圈式结构及其负载时磁通分布和外特性曲线

a) 动圈式结构 b) 负载时磁通分布 c) 外特性曲线

$$X_{ZL} = K(1 - \lambda)^2 N_2^2 \quad (1-2-11)$$

式中 K ——由变压器结构参数决定的系数；

$$\lambda \text{ ——重合率, } \lambda = \frac{N_{I\text{II}}}{N_{\text{II}} + N_{\text{III}}},$$

λ 小则 X_{ZL} 大。

可见：转换开关改变 $W_{\text{I II}}$ 和 W_{II} ，即改变 λ 分级细调电流，一般都是在减少 $W_{\text{I II}}$ 的同时增加 W_{II} ，使 U_0 几乎不变，外特性曲线如图 1-2-9b 所示。有的还用 W_2 换挡粗调电流。

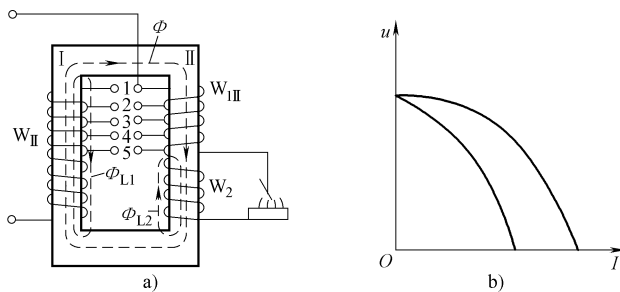


图 1-2-9 抽头式结构和磁通分布及其外特性

a) 抽头式结构和磁通分布 b) 外特性

2.3 弧焊发电机及硅弧焊整流器

在 20 世纪中期就有了专用的直流弧焊发电机。它曾经起过重要作用，但存在耗电、费材料、噪声大、冲击电流大等缺点，随着半导体技术发展和新型直流弧焊电源出现而被取代，尚存少量以内燃机为动力机的直流弧焊发电机，用于没有电网的野外作业。

1960 年之后具有较好性能的大容量硅二极管问世，使硅弧焊整流器应运而生，其性能优于弧焊发电机，在一定程度上克服了存在的问题。

2.3.1 内燃驱动式弧焊发电机的基本原理及其分类

1. 弧焊发电机基本原理

直流弧焊发电机由一台电动机（或柴油、汽油驱动原动机）和弧焊发电机组成。这里仅讨论与弧焊电源相关的发电机。基于一般发电机原理，为满足焊接电弧及其工艺要求而有其特殊电气性能，主要用于焊条电弧焊、埋弧焊和钨极氩弧焊，需具有下降特性、良好的调节性能和动特性。

直流弧焊发电机和一般发电机一样，都是靠电枢上的导体切割磁极和电枢之间气隙内的磁力线而感应出电动势 E 。

$$E = 4.44fN\Phi = 4.44\frac{nP}{60}N\Phi = K\Phi \quad (1-2-12)$$

式中 f ——切割磁力线的频率；

N ——每分钟转速；

P ——磁极数目；

Φ ——每个主磁极磁通量；

K ——常数，由电枢转速及结构确定。

发电机电枢电压 U_a 为

$$U_a = E - I_a R_a \quad (1-2-13)$$

式中 I_a 、 R_a ——各为电枢电流和电阻。

通常 R_a 很小可忽略，一般发电机 Φ 与 I_a 无关，外特性是平的。由式 (1-2-12)、式 (1-2-13) 可知，为获得下降特性有以下几种办法：

(1) 在电枢电路中串联电阻 如图 1-2-10 所示，发电机本身是平特性，即 $U_a \approx E \approx U_0$ 。靠电阻器 R_z 获得下降特性和调节电流、限制 I_{wd} 。负载电压 U_f 与负载电流 I_f (I_a) 的关系为

$$U_f = U_0 - I_f R_z = E - I_f (R_a + R_z) = U_0 - I_f (R_a + R_z) \quad (1-2-14)$$

这种方法的缺点是能量损耗大，曾用于多站式直流弧焊发电机。

(2) 在电枢电路中设立去磁 由式 (1-2-12) 可见，电枢电动势 E 与 Φ 成正比，因而只要设法让 Φ 随 I_f 的增大而减小，即只要去磁作用与负载电流成正比，就可等效为在电枢串联了电阻 R_b 。这样既靠去磁获得下降特性又不增加能量损耗。其等效电路外特性方程式为

$$U_f = U_0 - I_f R_b \quad \text{或} \quad I_f = \frac{U_0 - U_f}{R_b} \quad (1-2-15)$$

由式 (1-2-15) 可知，改变 U_0 及去磁等效电阻 R_b 都可调节电流。

2. 弧焊发电机分类

(1) 根据产生去磁磁通的不同方法分类

1) 差复励式：他励绕组 W_p 和串联去磁绕组 W_E ，二者产生磁通 Φ_p 与去磁 Φ_E 方向相反，如图 1-2-11 所示。

2) 裂极式：把磁极做成特殊形状的裂极式，使电枢产生反应去磁。

3) 换向极去磁式：把用以改善换向条件的换向极故意做得较宽且不对称，而产生去磁。

(2) 按原动机不同分类

1) 直流弧焊发电机：电动机为三相异步型。

2) 直流弧焊柴（汽）油发电机：它用柴油机或汽油机驱动发电机，也可用汽车的发动机驱动一台或两台发电机。图 1-2-12 所示为新型弧焊发电机，原动机为柴油或汽油发动机，发电机为平特

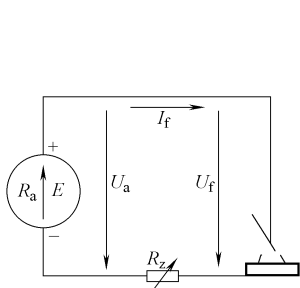


图 1-2-10 串联电阻获下降特性电路

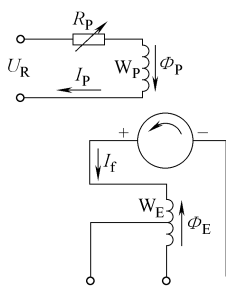


图 1-2-11 他励差复励式原理图



图 1-2-12 新型内燃驱动式弧焊发电机

性的普通发电机，通过电路实现整流、功率晶体管斩波或逆变、直流滤波输出等环节，以满足焊接工艺要求。外特性和参数调节通过电子控制实现，降低了整机的重量和体积，提高了效率，控制性能和品质较好，具有多种功能，可以得到不同外特性输出，既能直流焊接，又能交流和脉冲电流焊接，应急情况下可作为发电机满足交流和脉冲电流焊接，还可作为发电机满足照明需要或进行蓄电池充电等。

2.3.2 硅弧焊整流器

1. 硅弧焊整流器基本原理

为了获得脉动小、平稳的直流电和电网负荷均衡，通常采用三相整流硅弧焊整流器，其原理框图如图 1-2-13 所示。

(1) 主变压器 把三相 380V 电压降至所要求的空载电压 U_0 。

(2) 整流器 把三相交流电整流成直流。

(3) 输出电抗器 接在焊接回路中的直流电感（由带空气隙的铁心和线圈构成），改善动特性和滤波。

(4) 电抗器 可以是交流电抗器或磁放大器（磁饱和电抗器），当主变压器为增强漏磁式或要求平特性时，则可不用电抗器。实质上它是用于外特性和焊接参数的控制调节机构，一般有机械式和电磁式两种。

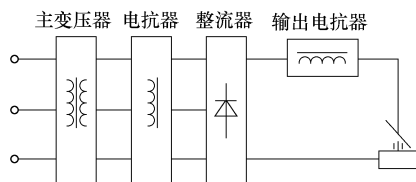


图 1-2-13 硅弧焊整流器原理框图

2. 机械控制式硅弧焊整流器原理与分类

把上述单相动铁心式、动线圈式、抽头式弧焊变压器做成相应的三相变压器，并通过三相桥式整流器整流输出，就成为动铁心式、动线圈式、抽头式弧焊整流器，而且分别由动铁心磁分路、动线圈的漏抗和绕组抽头匝数比及其漏抗，获得下降特性和调节电流。其原理与单相弧焊变压器类同，适用于焊条电弧焊、钨极氩弧焊、等离子弧焊。如抽头式弧焊整流器的一、二次绕组耦合紧密，输出为平特性和用匝数比调节电压大小，可用于半自动 CO_2 焊。这类弧焊整流器的优点是简单经济可靠，易造易修易维护；缺点是调节不灵活、精度较差，无补偿、遥控和自动化。主要产品有：动铁心式 ZX—320，动线圈式 ZXG1—160、ZXG1—250、ZXG1—400、ZXG6—300，抽头式平特性 NBC—250B、NBC—350B 等。

抽头式平特性弧焊整流器是硅弧焊整流器用得最多的一种，基本电路原理及其外特性如图 1-2-14 所示，由正常漏磁三相降压变压器 T、整流器 UR 和输出电抗器 L_K 组成。为了调节输出电压，在一次绕组上设有许多抽头，以便改变其匝数比。

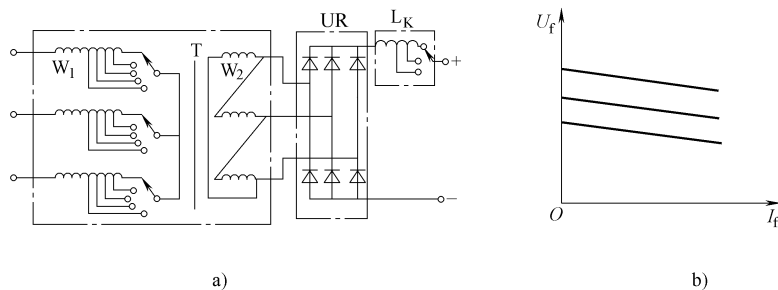


图 1-2-14 抽头式电路原理及其外特性曲线

a) 电路原理 b) 外特性曲线

3. 电磁控制式硅弧焊整流器原理与分类

(1) 基本原理和分类 磁放大器式弧焊整流器是典型、相对较多用的电磁控制式硅弧焊整流器，如图 1-2-15 所示，由平特性降压三相变压器 T、磁放大器 AM、整流器 UR 和输出电抗器 L_K 等组成。AM 是用于获得和控制外特性、调节焊接参数的关键性电磁控制元件。它由交流绕组 $W_{A1} \sim W_{A6}$ 、直流励磁控制绕组 W_C 和内桥反馈电阻 R_n 组成。内桥电阻 R_n （三种设置： $R_n > 0$ ； $R_n = \infty$ ； $R_n = 0$ ）的大小和有无，所起的内反馈去磁作用不同，而分别形成所谓部分内反馈、全内反馈和无反馈磁放大器式三种具有下降、陡降、平特性的弧焊整流器，为便于对比分析将其电特性归纳于表 1-2-1。它通过直流励磁绕组 W_C 电流，控制直流磁通和 AM 磁饱和程度大小（即交流电抗大小）来调节焊接参数。

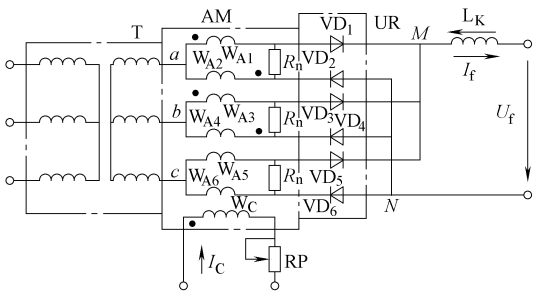


图 1-2-15 内桥反馈磁放大器式弧焊整流器原理图

表 1-2-1 三种反馈磁放大器式弧焊整流器电特性对比表

	部分内反馈式	全反馈式	无反馈式
单相电路图			
内桥电路	R_n 为较小值	$R_n = \infty$	$R_n = 0$ W_A 并联,也可串联
外特性			
调节特性 (性能)			

(2) 结构特点和产品

1) 结构特点。以较大的铜铁材料、功率硅元件和简单电路等做成，可靠性高，技术难度较小，但在动特性方面存在问题：磁放大器的多个绕组带来较大的磁惯性，短路电流上升率和峰值较大，而衰减较慢，造成引弧冲击大和熔滴飞溅严重；从短路到负载时瞬态负载电流最小值较低，降低了电弧稳定性并减弱了电弧的“挺度”和穿透力。需在主回路中串接输出电抗器抑制电流冲击和下跌的变化，改善动特性。此外，由于它耗材、耗电多，笨重，维修不便等缺点，越来越多地被弧焊逆变器、晶闸管式弧焊整流器所取代。

2) 主要国产产品。无反馈式有 ZXG7—300、ZXG7—500 型，用于焊条电弧焊。ZXG7—300—1

用于钨极氩弧焊和焊条电弧焊。全内反馈式有 ZPG1—500、ZPG1—1500、ZPG2—500、GB—500 型,用于 CO_2 焊或 MAG 焊。它是在国内外应用较多的一种。另外,还有可兼获多特性弧焊整流器,如有 ZDG—500—1、ZDG—1000R、ZPG—1000 型等,用于焊条电弧焊、埋弧焊、 CO_2 焊等。

2.3.3 交直流两用及脉冲式弧焊整流器

1. 交直流两用式硅弧焊整流器

结构最为简单的交直流两用式硅弧焊整流器基本原理电路如图 1-2-16 所示,由下降特性的交流弧焊变压器 T、单相桥式整流器 UR 和电抗器 L_K 组成,把交流 AC 输出端 1、2 短接,即从 DC 输出端提供直流焊接电流;把 DC 输出端短接,从 AC 端输出交流电。由于电抗器 L_K 的串入且总是通过直流电,对电流有滤波作用,使普通交流波形 1 变成呈接近梯形波 2,如图 1-2-16 的右波形,可见过零点附近的时间较短,故容易再引弧,又因焊接电流半波接近于恒定直流,电弧较稳定。

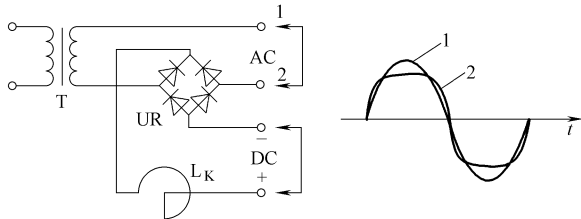


图 1-2-16 交直流两用式电路原理及其交流波形图

国内外都有这类交直流两用式硅弧焊整流器。国产型号有 ZXG3—300、ZXG9—300、ZXG9—500、ZXG3—300—1 等。

2. 脉冲式硅弧焊整流器

(1) 单相整流式脉冲弧焊电源 有并联式、可调并联式两种。其优点是结构简单、操作容易、成本低。缺点是调节参数不多且互相影响,只适合于一般要求的脉冲弧焊工艺。

1) 并联式:用一台直流弧焊电源提供基本电流,另一台带抽头变压器的单相半波(S 打开)或全波(S 闭合)整流器与其相并联,提供脉冲电流,如图 1-2-17 所示。

2) 可调并联式:与上述基本原理相同,只是不用带中心抽头的变压器,改用两台二次电压和容量都不同的变压器分别作为正负半周的交流电源,交替工作。二次电压较高者提供脉冲电流;二次电压较低者提供基本电流。它们分别可调,互不影响。

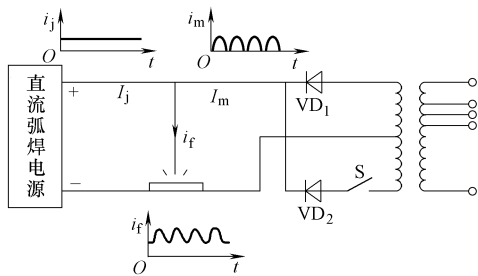


图 1-2-17 并联式单相整流脉冲弧焊电源原理图

(2) 磁放大器式脉冲弧焊电源 可以采用主变压器二次三相电压不平衡、三相磁放大器交流阻抗不平衡或者为励磁控制绕组提供脉冲电流等方法而获得脉冲焊接电流。这种脉冲弧焊电源控制功率较小,结构简单,波形和电流调节方便,但是时间常数大,脉冲频率低于 10Hz。它适合于熔化极气体保护电弧焊。

2.4 晶闸管式弧焊整流器及其特点

晶闸管(Thyristor)是晶体闸流管的简称,又称为可控硅整流器(Silicon Controlled Rectified, SCR),简称可控硅。1956 年美国发明了晶闸管,在 20 世纪 60 年代初期出现了晶闸管式弧焊整流器。它与晶体管式同属电子式控制类弧焊整流器。后者耗电较大,逐步被节能省材的弧焊逆变器代替。

2.4.1 晶闸管式弧焊整流器的基本原理及特点

1. 主要组成及其基本原理

晶闸管式弧焊整流器基本原理框图如图 1-2-18 所示, 可见它是一种典型的电子控制型弧焊电源, 供电系统、功率系统分别由三相变压器 T 和晶闸管组 V、直流电抗器 L 组成。二极管组 VD 和限流电阻 R 构成维弧电路。电子控制系统由给定电路 G、负反馈检测电路 M、比较放大电路和触发电路组成。

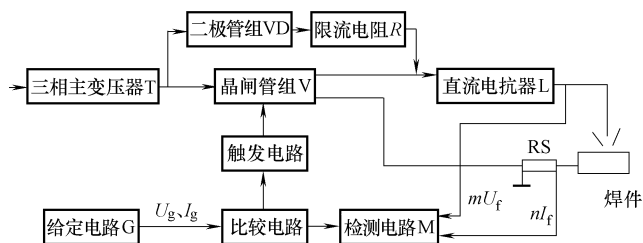


图 1-2-18 晶闸管式弧焊整流器基本原理框图

大功率晶闸管组 V 受控于移相触发电路, 移相改变晶闸管导通角大小, 导通角大 (控制角 α 小), 则焊接电流 (电压) 也大。反之亦然。触发脉冲相位由 G、M、比较放大电路和触发电路产生, 分别只取电流或电压或按一定比例联合取负反馈信号, 便可获得所需恒流、恒压特性或任意形状的外特性、调节性能。

2. 主要特点及问题

(1) 控制性能好 与上述硅弧焊整流器比, 可用较小功率触发信号控制大功率的输出和不同形状外特性和直流、脉冲电流, 且可无级、自动、远控, 调节大范围的焊接参数, 有输出补偿参数, 稳定性好。

(2) 动特性好 与磁放大器式弧焊整流器相比, 内部电感、磁惯性小得多, 系统时间常数仅为它们的 1/10 以下 (仅十几毫秒), 动态反应快, 可用电子电抗器进行控制和调节。

(3) 省材、节能和便于多用

但也有一定问题: 输出电流和电压通过调节晶闸管的导通角来实现, 电流电压波形脉动和谐波问题比硅弧焊整流器大, 尤其采用小焊接参数焊接时, 导通角较小, 波形脉动加剧, 甚至不连续, 电弧不稳定。

2.4.2 主电路的基本形式及其工作原理

晶闸管式弧焊整流器主电路有三种: 三相桥式半控、三相桥式全控和带平衡电抗器双反星形主电路。

1. 三相桥式全控整流主电路

三相桥式半控整流主电路由三个晶闸管共阴极和三个二极管共阳极电路组成, 只用三只晶闸管和三个触发单元, 线路比较简单、可靠、经济, 较易调试; 缺点是调至低压或小电流时波形脉动较明显, 需配大电感量输出电抗器, 较少用。

把上述三个二极管代之以晶闸管, 就成为较常用的三相桥式全控整流电路, 如图 1-2-19 所示, 其控制角 α 在 $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ 范围内, 为了获得一周有六个波峰的负载电压波形, 则需同时触发两组晶闸管。要求同组各个晶闸管触发电压互差 120° , 二组之间互差 60° 。这样每隔 60° 按序触发一只晶闸管, 在负载两端每周出现 u_{ab} 、 u_{ac} 、 u_{bc} 、 u_{ba} 、 u_{ca} 、 u_{cb} 六个波峰。由于直流电抗器电感的滤波作用而变得平稳, 当 $L \rightarrow \infty$ 时, I_d 波形也趋于水平。

当线电压过零变负时, 电感电势仍为晶闸管提供正向阳极电压, 使其不致关断。只要电感 L 足够大, 已导通的晶闸管就可继续导通至下一次触发换相, 而使 u_d 波形连续。图 1-2-20a 所示为 $\alpha =$

90°时的 u_d 波形, 正负部分对称, $U_d = 0$ 。要求其触发脉冲 (图 1-2-20b) 移相范围为 90°。电感足够大使负载电流连续的条件:

$$U_d = 2.34 U_2 \cos \alpha \quad (1-2-16)$$

当 $\alpha = 0^\circ$ 时, $U_d = 2.34 U_2$; 当 $\alpha = 90^\circ$ 时, $U_d = 0$ 。

由上述分析可知, 三相桥式全控整流电路的输出电压每周有 6 个波峰, 脉动较小, 所需配用的输出电感量也较小。其变压器是通用的, 易于制造。但要用 6 只晶闸管、6 套触发电路, 使电路复杂, 增加了调试和维修的难度。

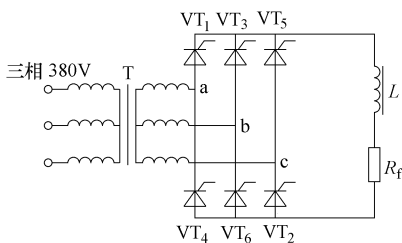


图 1-2-19 三相桥式全控整流主电路图

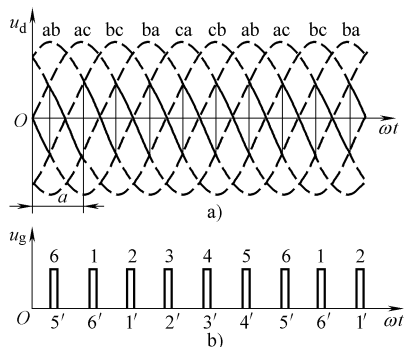


图 1-2-20 三相桥式全控整流电路电压波形

2. 带平衡电抗器双反星形可控整流主电路

其基本电路如图 1-2-21 所示, 由六个晶闸管、一个平衡电抗器 LB 和一个主变压器组成。三相主变压器的二次有两组绕组, 各以相反极性联成星形, 故称“双反星形”。实际上, 它只不过是平衡电抗器 LB, 并联起来的两组三相半波可控整流电路。图中, $-a$ 、 $-b$ 、 $-c$ 点的电压各与 a 、 b 、 c 点的电压反相, VT_1 、 VT_3 、 VT_5 构成的三相半波整流电路称为正极性组, VT_2 、 VT_4 、 VT_6 构成的三相半波整流电路称为反极性组。平衡电抗器是带有中心抽头的电感, 抽头 O 两侧的线圈匝数相等。

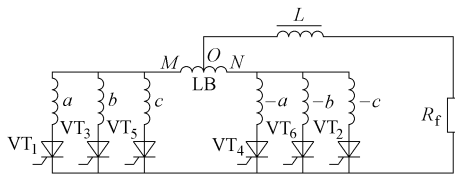


图 1-2-21 带平衡电抗器双反星形整流主电路

带平衡电抗器双反星形整流主电路中要有足够大的电感, 与上述主电路相比, 它的结构、工作原理特点如下:

(1) 相当于正极性和反极性两组三相半波整流电路并联 各组输出电压波形如图 1-2-22a、b 中实线所示, 是各相电压的包络线。各相电流流通时间可延长至 120° , 同时有两个晶闸管并联导电, 每管分担 $1/6$ 负载电流。而三相桥式整流电路相当于两个三相半波整流电路的串联, 同时有两个整流元件串联导电, 每个晶闸管分担 $1/3$ 负载电流, 所用晶闸管额定电流也大, 有两管子压降损耗, 效率较低。因而, 它更适合于要求大电流低电压的弧焊电源。

(2) 六个晶闸管及其触发电路 比三相桥式半控整流主电路复杂, 比三相桥式全控整流主电路简单。

(3) 整流电压波形为每个周波六个波峰 其脉动程度比三相桥式半控小, 最低谐波为六次, 输出电抗器的电感量及体积都较小。

(4) 需用平衡电抗器 为保证电路能正常工作, 其铁心不宜饱和。

为此, 应避免该铁心被直流成分所磁化, 要求抽头两边线圈的直流安匝相互抵消, 即两组整流电

路的参数（主要是变压器的匝数和漏感）应对称，这就给变压器制造和元件的挑选增添了麻烦。

2.4.3 移相触发电路的基本形式及其工作原理

晶闸管是半控型器件。它最重要的特性是正向导通的可控性，当阳极加上一定值的正向电压和在门极与阴极之间加上足够大的正向控制电压、电流，以及达到晶闸管导通的维持电流时，晶闸管才能从阻断转化为导通。晶闸管导通后，门极控制信号就失去了控制作用，直到电源过零时，其阳极电流小于维持电流，晶闸管才自行关断。根据这一特性，触发电压、电流可以是交流、直流或短暂的脉冲电压、电流，为减少门极损耗与触发功率，常采用脉冲电压、电流触发晶闸管。

1. 对触发脉冲的要求

(1) 用触发电路产生移相触发脉冲 为保证晶闸管可靠工作，触发脉冲必须满足如下要求。

- 1) 触发脉冲应有足够功率。信号极性要求门极为正，阴极为负。晶闸管触发电压一般在 $2 \sim 4\text{V}$ ，触发电流一般在 $50 \sim 200\text{mA}$ 。
- 2) 触发脉冲相位与加在晶闸管上的阳极电压同步，以保证每个周期中都同相位触发。
- 3) 触发脉冲可移相且达到所要求的移相范围，以便获得所需外特性和焊接参数范围。三相桥式全控、带平衡电抗器双反星形整流电路，触发脉冲移相范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。三相半控整流电路则要求 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。
- 4) 触发脉冲应有一定宽度，且前沿应尽可能陡，确保晶闸管可靠导通。对于三相全控整流电路，要求脉冲宽度大于 60° 或采用双窄脉冲（每个触发单元的一个周期内输出两个间隔的脉冲）。
- 5) 多路触发脉冲之间应有电气隔离：尤其是在三相全控整流电路中各路触发脉冲必须在电气上隔离。

(2) 带平衡电抗器双反星形整流主电路所需触发电路的套数（对于其他整流电路可作参考）

1) 用六套触发电路：该整流电路中有六只晶闸管，每只晶闸管需要一套触发电路，总共需要六套。

2) 用三套触发电路：该触发电路由正、反极性两组三相半波电路组成，由于 a 与 $-a$ 相、 b 与 $-b$ 相、 c 与 $-c$ 相的晶闸管的阳极电压刚好相反，每组完全可以共用一套触发电路，共三套触发电路。

3) 用两套触发电路：把主电路接成共阳极接法，各晶闸管在负半周导通，则可以采用两套触发电路。

2. 移相触发电路

门极控制电路称为触发电路。一般它由同步电路、脉冲形成电路、脉冲移相和放大电路等组成。按触发电路使用的器件可分为单结晶体管触发电路、晶体管触发电路、数字式移相触发电路和集成触发电路四种。

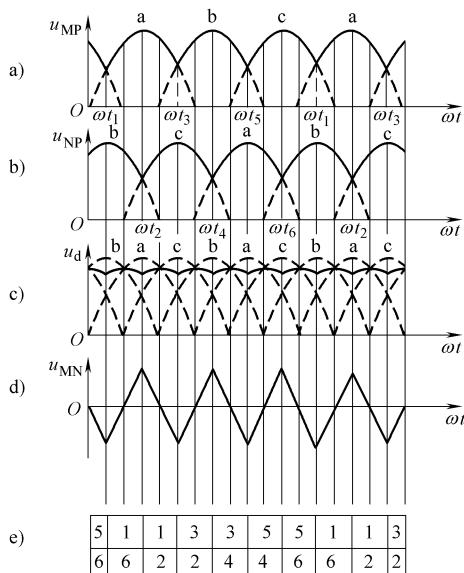


图 1-2-22 主电路波形图电阻负载 ($\alpha = 0$)

a) 正极性组整流波形 b) 反极性组整流电压波形 c) 负载电压波形 d) 平衡电抗器两端电压波形 e) 整流元件导通顺序

(1) 单结晶体管触发电路 利用单结晶体管的工作特性和相关电容组成的张弛振荡器不断产生振荡,并由脉冲变压器输出移相触发脉冲。结构简单可靠,成本低,适用于中小功率的可控整流器。

(2) 晶体管触发电路 利用晶体管工作特性和相关的移相、同步电路,产生移相触发脉冲,较多用于大、中功率的可控整流器。它们对触发电路的精度要求较高,对功率要求较大。

(3) 数字式移相触发电路 如图 1-2-23 所示,它是采用计数器对输入脉冲(即数字量频率信号)进行计数,设输入脉冲的频率为 f ,则计数器的输出量 n 与输入频率 f 的关系为

$$n = \int_0^T f t \quad (1-2-17)$$

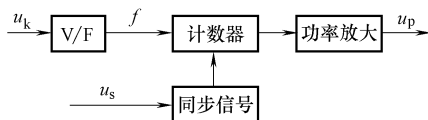


图 1-2-23 数字式移相触发电路原理图

当计数器的输出量 n 达到某一给定数值 m 时,计数器输出触发脉冲。同步信号对计数器起清零作用,所以 n 从零到 m 所需 T 就是控制角 α 。改变频率 f ,则 n 从零到 m 所需 T 就发生变化,相应的 α 也发生改变。通常是通过改变控制电压 u_k 来改变 f 。

(4) 集成触发电路 移相触发电路的设计,20 世纪 60 年代至 70 年代采用分离元件,80 年代经历模拟→数字集成时期,现在已完成了大规模集成电路和全数字化转变,并已逐步取代分离元件电路。

集成触发电路可靠性高,技术性能好,体积小,功耗低,调试方便。国内常用的有 KJ 系列和 KC 系列。

1) 特点: KC04 (或 KJ004) 晶闸管移相触发电路适用于单相、三相全控桥式供电装置中,作晶闸管的双路脉冲移相触发。KC04 器件输出两路相差 180° 移相脉冲,可以方便地构成全控桥式触发器线路,具有输出负载能力大,移相性能好,正负半周脉冲相位均衡性好、移相范围宽、对同步电压要求低,有脉冲列调制输出端等功能与特点。

2) 基本原理:采用 KC04 组成的三相全控桥式整流电路如图 1-2-24a 所示。同步电压由同步变压器提供,由于 KC04 中 VT_8 、 VT_{12} 的脉冲分选作用,使同步电压在一周内有两个相位上相差 180° 的脉冲产生。这样,要获得三相全控桥式整流电路脉冲,只需要三个与主电路同相的同步电压即可,如图 1-2-24b 所示。采用三片 KC04 元件组装的六脉冲触发电路,二极管 $VD_1 \sim VD_{12}$ 组成六个或门形成六路脉冲,并由晶体管 $VT_1 \sim VT_6$ 进行脉冲功率放大,如图 1-2-24c 所示。 $RP_1 \sim RP_3$ 为锯齿波斜率电位器, $RP_4 \sim RP_6$ 为同步相位微调电位器,调节这些电位器就能得到理想的三相平衡度。移相触发电路无论采用哪种方式,都是通过一个控制电压产生一系列与交流电压保持同步(即同相或固定相位差)的触发脉冲信号,最终实现电源的功率输出。

2.4.4 外特性及调节性能原理

晶闸管式弧焊整流器采用电流反馈、电压反馈或电流电压联合反馈,可得到不同的外特性和实现焊接参数的调节,获得所需的调节性能。

(1) 开环特性 在开环运行情况下,没有引入任何反馈,从主电路分析已知,晶闸管式弧焊整流器的输出空载电压 U_0 与控制角 α 的关系为

$$U_0 = AU_2 \cos \alpha \quad (1-2-18)$$

式中 A ——主电路结构系数,三相桥式全控 $A = 2.34$,六相半波 $A = 1.35$,双反星形带平衡电抗器 $A = 1.17$;

U_2 ——变压器二次相电压;

α ——控制角。

$$U_f = U_0 - I_f R_0 \quad (1-2-19)$$

(2) 闭环基本特性 将晶闸管式弧焊整流器的输出电压 U_f 、电流 I_f ，通过某种采样环节及放大环节，再与给定量进行比较和放大，形成控制电压 U_k 。 U_k 再作用于移相触发电路和主电路，便构成了闭环反馈系统，其原理框图如图 1-2-25a 所示。在这个系统中，输入控制电压 U_k 与输出电压 U_f 成正比，其比例系数（传递函数）为 K_3 ；主电路等效电阻为 R_0 ； m 为电压反馈系数； n 为电流反馈系数； U_{gu} 为电压给定量； U_{gi} 为电流给定量； K_1 为电压反馈环节误差放大倍数； K_2 为电流反馈环节误差放大倍数。该闭环反馈控制系统的外特性方程为

$$U_f = U_0 - I_f R_0 = K_3 U_k - I_f R_0 \quad (1-2-20)$$

式 (1-2-20) 与式 (1-2-19) 看来完全相同，而实质是不同的。在开环控制方程式 (1-2-19) 中， U_k 是一固定的给定电压，与输出无关。而式 (1-2-20) 的 U_k 不仅与输出 U_f 、 I_f 有关，还与给定值、反馈系数有关，即为

$$U_k = U_{ku} + U_{ki} = K_1 (U_{gu} - m U_f) + K_2 (U_{gi} - n I_f) \quad (1-2-21)$$

式中 U_{ku} —— $U_{ku} = K_1 (U_{gu} - m U_f)$ 的控制量；

U_{ki} —— $U_{ki} = K_2 (U_{gi} - n I_f)$ 的控制量；

U_k —— $U_k = U_{ku} + U_{ki}$ ，为电压、电流反馈的合成结果。将 U_k 代入式 (1-2-20) 中得

$$U_f = K_3 \{ K_1 (U_{gu} - m U_f) + K_2 (U_{gi} - n I_f) \} - R_0 I_f \quad (1-2-22)$$

对式 (1-2-22) 进行整理，并写成外特性的基本表达式： $U_f = U_0 - R_n I_f$ （其中 R_n 为等效内阻），则

$$U_f = \frac{K_3 K_1 U_{gu} + K_3 K_2 U_{gi}}{n K_3 K_2 + R_0} - \frac{n K_3 K_2 + R_0}{1 + m K_3 K_1} \quad (1-2-23)$$

可见，如图 1-2-25b 所示，下降特性曲线 2 的两个特殊点参数为

$$I_f = 0, \quad U_f = U_0 = \frac{K_3 K_1 U_{gu} + K_3 K_2 U_{gi}}{1 + m K_3 K_1} \quad (1-2-24)$$

$$u_f = 0, \quad I_f = I_{wd} = \frac{K_3 K_1 U_{gu} + K_3 K_2 U_{gi}}{n K_3 K_2 + R_0} \quad (1-2-25)$$

式 (1-2-23) 中对电流 I_f 求导数，得到 U_f 对 I_f 的变化率（外特性斜率）， I_{wd} 取决于等效内阻 R_n ，即

$$R_n = \frac{n K_3 K_2 + R_0}{1 + m K_3 K_1} \quad (1-2-26)$$

由此可见，在闭环反馈系统中，通过改变反馈系数、放大倍数和给定值等即可改变弧焊电源外特性曲线形状和调节性能与参数。如按一定比例取 m 、 n 反馈系数，可获不同斜率下降特性。

(3) 陡降特性 增加等效内阻 R_n ，随着 I_f 增加 U_f 迅速下降，获得陡降特性。只取电流反馈 $n \neq 0$ 、 $m = 0$ ，通常 $R_0 \ll n K_3 K_2$ 、 $R_n = n K_3 K_2$ ，由式 (1-2-25) 可得

$$I_f \approx I_{wd} = U_{gi} / n \quad (1-2-27)$$

即改变 U_{gi} 或 n ，可调节 I_f 、 I_{wd} 的大小。

(4) 平特性 等效内阻 R_n 极小，随着 I_f 增加 R_n 的压降很小，可获得平特性。只取电压反馈

$m \neq 0, n = 0$, 通常 R_0 本身就很小, 又 $mK_3K_1 \gg 1$, 由式 (1-2-24) 可得

$$U_f \approx U_0 = U_{gu}/m \quad (1-2-28)$$

也就是说, 调节输出电压 U_f 或 U_0 , 可通过改变 U_{gu} 或 m 来实现。

对于晶闸管式弧焊整流器, 国内各电焊机厂家生产的电路形式很多, 不同形式的主电路和控制电路可以组成多种实用电路, 其中生产和应用较为普遍的是 ZX5 系列, 包括 ZX5—250、ZX5—400、ZX5—630、ZX5—1000 等。

2.4.5 晶闸管式脉冲和矩形波交流弧焊电源

1. 晶闸管式脉冲弧焊电源基本原理及其特点

以晶闸管作为开关产生脉冲波形, 称为晶闸管式脉冲弧焊电源, 可分为给定值式和断续器式两种。

(1) 晶闸管给定值式脉冲弧焊电源 它的主电路和控制电路工作原理与晶闸管式弧焊整流器基本相同, 如图 1-2-25a 所示。二者的不同点是: 恒流特性时, 后者的给定值 U_{gi} 和主电路输出电流均为直流; 而前者 U_{gi} 和输出电流均为脉冲。当给定电压为高幅值时, 主电路输出高幅值脉冲电流; 当给定电压为低幅值时, 主电路输出基本电流。平特性时, 脉冲式给定值 U_{gu} , 输出电压脉冲。特点如下:

- 1) 输出的脉冲电流波形为方波或带前沿尖峰的方波。
- 2) 脉冲、基本电流都由同一电源供给, 是一体式脉冲弧焊电源。
- 3) 脉冲频率、脉冲、基本电流幅值、脉宽比等均可无级调节, 操作方便。
- 4) 脉冲频率调节范围较小, 一般为 $0.2 \sim 10\text{Hz}$, 比较适用于钨极氩弧脉冲焊接。
- 5) 易于实现直流和脉冲两用, 控制线路比较复杂, 不易维修。

(2) 晶闸管断续器式脉冲弧焊电源 由晶闸管式弧焊整流器和断续器两部分组成。

晶闸管断续器在脉冲弧焊电源中所起的本质作用, 相当于功率电子开关, 把直流弧焊电源供给的连续直流电流切断为周期性间断的脉冲电流。

焊接电流一般都比较大, 从几十安到几百安。在大电流回路中, 晶闸管的工作具有“开易关难”的特点。常用如下两种方法使晶闸管关断:

- 1) 使阳极电流低于维持电流或切断阳极电流, 晶闸管就由导通变为关断, 仅用于低频电路。
- 2) 在阳极和阴极之间加反向电压, 强迫关断晶闸管。采用可关断晶闸管, 门极加负信号使其关断。

按晶闸管断续器放在交流或直流侧的不同, 可分为交流断续器和直流断续器两类。

2. 晶闸管式矩形波交流弧焊电源

矩形波交流电流与正弦波比较, 除电流过零点时上升与下降率高的特点外, 这里还通过电子控制, 使正、负半波通电时间比和电流比值均可自由调节, 适合用于要求较高的铝及其合金的钨极氩弧焊, 电弧稳定, 电流过零点时重新引弧容易, 不必加稳弧器; 通过调节正、负半波通电时间比, 在保证阴极雾化作用下增大正极性电流, 可获得最佳熔深, 提高生产率和延长钨极寿命; 不必加消除直流分量装置; 还可用于碱性焊条电弧焊、埋弧焊, 电弧稳定, 焊缝成形良好, 无磁偏吹, 接头性能好。应用范围日益广泛。

矩形波交流弧焊电源可分为逆变器式、晶闸管电抗器式和数字开关式三种。

这里仅介绍晶闸管电抗器式矩形波交流弧焊电源。它的基本结构和原理与前述的交直流两用硅弧焊整流器类似, 只不过用晶闸管桥取代硅整流桥, 且波形更理想, 如图 1-2-26 所示, 通过晶闸管桥的开关和直流电抗器的储能作用, 把正弦波交流电流转变成矩形波交流电流。

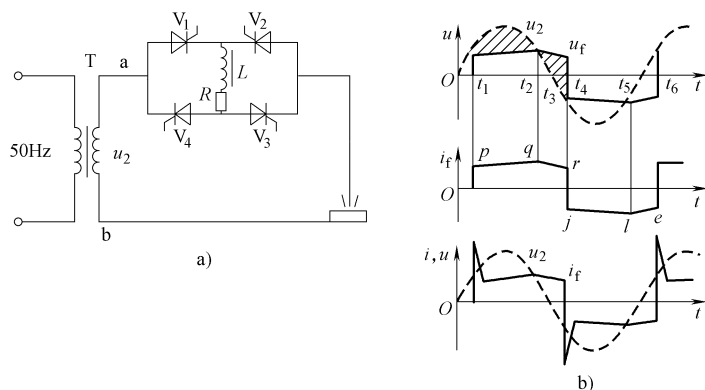


图 1-2-26 晶闸管电抗器式矩形波交流弧焊电源原理及其矩形交流波形图

a) 矩形波交流弧焊电源原理图 b) 矩形交流波形

2.5 弧焊逆变器

由直流 (DC) 向交流 (AC) 的变换称为逆变, 实现这种变换及具有焊接电弧、工艺所要求电特性的装置就称为弧焊逆变器。弧焊逆变器是在 20 世纪 70、80 年代, 随着功率电子、变频及其器件和微电子技术的发展, 而出现的节能、省材、轻量化、性能好的一种更新换代的弧焊电源, 并经历了晶闸管、晶体管、场效应管、IGBT 式弧焊逆变器的变化历程, 应用范围越来越广泛, 逐渐成为主导产品。

2.5.1 弧焊逆变器概论

弧焊逆变器是电子控制弧焊电源中的一种新形式。它的基本原理、主要组成与上述的晶闸管式弧焊整流器相比, 在本质上基本相同。其主要组成部分为供电系统、电子功率系统、电子控制系统、给定与反馈电路、焊接电弧等。采用闭环反馈系统控制电特性。但它的电子功率系统中功率开关管不是工作在功率降压变压器的二次侧 50Hz, 而是在一次侧并升频变换, 因而带来性能和结构的优越性。

1. 弧焊逆变器主要组成及其原理

(1) 弧焊逆变器主电路 由供电系统、电子功率系统和焊接电弧组成。

1) 供电系统: 把工频交流电变成直流向电子功率系统和电子控制系统供电。

2) 电子功率系统: 实质上是一次侧变频开关型功率系统, 即逆变主电路起分频开关、变换电参数作用, 按弧焊工艺要求向焊接电弧提供不同参数的大电流、低电压电能。必须指出, 一个电子功率系统其本身并不能用于焊接, 必须与电子控制系统紧密结合, 才能获得这些功能。

3) 电子控制系统 含驱动、反馈与给定闭环控制电路, 实现焊接电弧所需的电特性 (外特性、调节性能和动特性) 以及输出波形变换。基本组成和原理与前述基本相同, 不再赘述。

(2) 弧焊逆变器的基本原理 如图 1-2-27a 所示的系统控制框图, 在供电系统中, 三相 50/60Hz、380V 的交流电压, 经输入工频整流器 (UR_1) 整流和滤波器 (LC_1) 滤波之后, 获得逆变主电路所需的平滑直流电压约为 520V, 在电子功率系统中经功率开关管 (晶闸管、晶体管、场效应晶体管或 IGBT) 组 Q 的交替开关作用, 变成几千至 20 万以上赫兹 (Hz) 的中频高压电, 再经中频变压器 (T) 降至几十伏和快速整流器 UR_2 整流以及电抗器 L_2 、电容器 C_2 滤波, 变换成为直流输出。借助电子控制系统控制、驱动电路和给定与反馈电路 (M、G、A 等) 以及焊接回路的阻

抗, 获得弧焊工艺所需的电特性。如需用交流焊接时, 还需并联功率开关管组再次逆变和低频调制成为矩形波交流电。

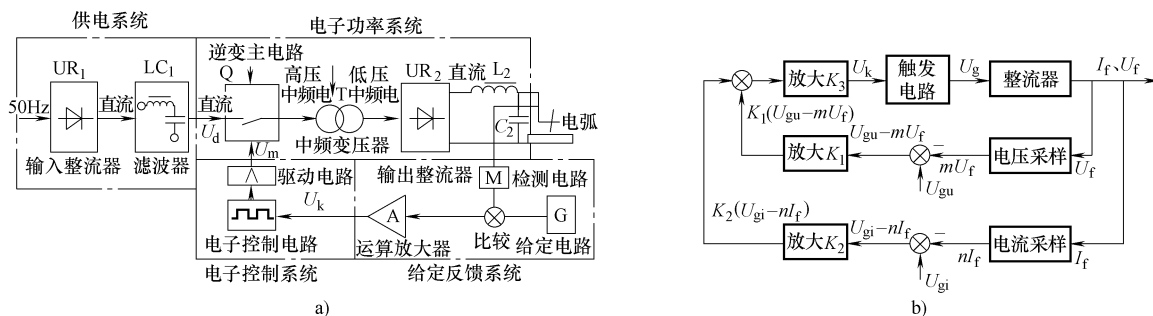


图 1-2-27 弧焊逆变器主要组成和基本原理及其闭环控制系统框图

a) 弧焊逆变器主要组成和基本原理框图 b) 闭环控制系统框图

在电网输入端往往设有输入电压软起动装置和防止合闸浪涌电流的电路环节。例如, 串入限流电阻, 在起动之后再将它短接; 串入晶闸管或改用输入晶闸管式整流器, 在起动过程中令其导通角逐渐增大; 低通滤波器置于输入整流器之前与工频电网连接, 以防止电网高频干扰进入和阻止本身高频干扰工频电网。

弧焊逆变器的变流过程: 工频交流 (AC) → 直流 (DC) → 中频 AC → 降压 → AC → DC。弧焊逆变器也称为弧焊整流器、逆变式弧焊整流器、逆变式弧焊电源。

2. 弧焊逆变器的输出电特性

电特性包括外特性、调节性能和动特性及其控制方式。

(1) 外特性和调节性能 根据图 1-2-27a 所示的弧焊逆变器的基本原理框图, 就可描绘出图 1-2-27b 所示的闭环控制系统框图、方程式和实现对外特性等电特性控制。输出电压 U_f 经电压环节采样分压比 m , 获得反馈量 mU_f ; 输出电流 I_f 经电流采样环节 n 获得反馈量 nI_f 。 mU_f 和 nI_f 又分别经比较放大环节 K_1 、 K_2 与电压给定量 U_{gu} 、电流给定量 U_{gi} 比较及放大 K_1 、 K_2 倍, 各自输出 $K_1(U_{gu} - mU_f)$ 和 $K_2(U_{gi} - nI_f)$ 。最后, 经综合、放大 K_3 倍得到控制电压 U_k , 再输入控制驱动电路, 驱动逆变器运行。

$$U_k = K_3 [K_1 (U_{gu} - mU_f) + K_2 (U_{gi} - nI_f)] \quad (1-2-29)$$

一般 U_k 很小, 而 K_3 很大, 式 (1-2-29) 可写成

$$U_k = K_3 [K_1 (U_{gu} - mU_f) + K_2 (U_{gi} - nI_f)] \approx 0 \quad (1-2-30)$$

1) 恒压特性: 只取电压负反馈, 即 $mU_f \neq 0$, $nI_f = 0$, 由式 (1-2-30) 可得

$$U_f = U_{gu} / m \quad (1-2-31)$$

式中, m 取定常数, U_f 只取决于 U_{gu} , U_{gu} 大, U_f 也高, 恒压特性如图 1-2-28a 曲线 1 所示向上平移。

2) 恒流特性: 只取电流负反馈, 即 $nI_f \neq 0$, $mU_f = 0$ 时, 由式 (1-2-30) 可得

$$I_f = U_{gi} / n \quad (1-2-32)$$

式中, n 取定常数。 I_f 只取决于 U_{gi} , U_{gi} 大, I_f 也大, 恒流特性如图 1-2-28a 曲线 2 所示向右平移。

3) 缓降特性: 同时采用两个反馈, 可得缓降特性 (图 1-2-28a 曲线 3), $mU_f \neq 0$ 、 $nI_f \neq 0$ 时, 可得

$$\frac{\partial U_f}{\partial I_f} = -\frac{K_2 n}{K_1 m} \quad (1-2-33)$$

4) 恒流加外拖特性: 电压大于一定值时只取电流负反馈, 当电压小于此值时, 同时采用电压电流负反馈, 如图 1-2-28a 曲线 4 所示。

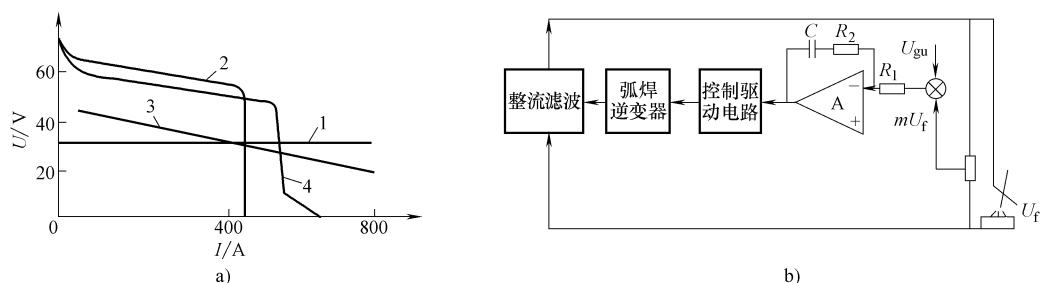


图 1-2-28 弧焊逆变器的外特性及电子电抗器电路

a) 外特性 b) 电子电抗器电路

1—恒压特性 2—恒流特性 3—缓降特性 4—恒流加外拖特性

(2) 动特性 在弧焊逆变器中通常采用如下两个方式改善和控制动特性:

1) 在焊接回路中串入电抗器。它由带有间隙的铁心(高值硅钢片或铁氧体、非晶态合金、超微晶合金)和绕组组成, 控制熔滴过渡的冲击电流峰值 I_{sd} 和上升斜率 di_{sd}/dt 使电弧稳定和减小飞溅。逆变器的纹波频率比传统弧焊整流器要高得多, 串入的电抗器只要几十微亨电感量。

2) 设计电子电抗器 如图 1-2-28b 所示, 采用电压负反馈, 把 $(U_{gu} - mU_f)$ 差值, 送入线性放大器“比例—积分”环节, 控制 di_{sd}/dt 和 I_{sd} , 等效于串入铁心电抗器。可用下式表达:

$$I_f \propto \int (U_{gu} - mU_f) dt \quad (1-2-34)$$

当电弧突然短路, U_f 突然降低至接近于零, 而 U_{gu} 不变, $(U_{gu} - mU_f)$ 的值突然增大, I_f 随时间沿斜直线上升。其上升斜率与“比例—积分”环节 R_1 、 C 、 R_2 和分压比 m 有关。通过适当地选择这些与时间常数有关的参数, 就可无级控制 di_{sd}/dt 和 I_{sd} 。

(3) 电特性和输出脉冲的控制方式 采用以下 3 种调节控制方式:

1) “定宽调频” PFM: 脉冲宽度不变, 改变频率, 频率越高, U_f 、 I_f 越大。反之亦然。频率高低按一定规律变化, 就形成一定形状外特性和不同参数脉冲输出。晶闸管式弧焊逆变器就是用这种方式。

2) “定频调宽” PWM: 脉冲频率不变, 改变脉宽比(占空比)。给定值越高, U_f 、 I_f 越大。反之亦然。脉宽比大小按一定规律变化, 就形成一定形状外特性和不同参数的脉冲输出。晶体管式、场效应管式和 IGBT 式弧焊逆变器均采用这种调节控制方式。

3) “宽频联合” PFWM: 即把定宽调频和定频调宽两种结合起来调节控制。如晶闸管式弧焊逆变器, 用换向电容的换挡进行粗调脉宽, 用改变频率进行细调节。

3. 逆变主电路基本形式

逆变主电路常工作于“空载—短路—负载”频繁变化的电弧负载之中, 且本身工作频率高达数千至数万 Hz, 又承受高电压、大电流, 工作条件严酷。整机能否可靠工作关键就在于此。必须根据弧焊方法、容量大小、直流输入电压和工作频率等来选择和设计逆变主电路的形式和结构。几种常用的逆变主电路形式如图 1-2-29 所示。

(1) 单端通向逆变主电路 如图 1-2-29a 所示, 功率开关管 V_1 、 V_2 同时按中频周期性通断, 把直流电逆变成断续的中频交流电, 经中频变压器 T 降压, 快速二极管 VD_1 整流, 电感 L_2 滤波, 向电弧输出直流电。两个开关管共同承受输入电压 U_d , 对耐压要求较低, 适用于中小功率逆变器。

(2) 半桥式逆变主电路 如图 1-2-29b 所示, U_d 被两组电解电容器 C_1 、 C_2 平分, 串联的两个功率开关管 V_1 、 V_2 轮流通断, 形成矩形波交流电。经 T 降压, VD_1 、 VD_2 的全波快速整流输出, VD_1 、 VD_2 承受双倍以上输出电压幅值。 V_1 、 V_2 只承受 $U_d/2$ 。

(3) 全桥式逆变主电路 如图 1-2-29c 所示, 由对边桥臂的两对功率开关管 V_1 、 V_4 和 V_2 、 V_3 按中频周期性轮流通断, 只承受 $U_d/2$, 适合于中大功率焊接。

(4) 并联式逆变主电路 也称推挽式电路, 如图 1-2-29d 所示, 功率开关管 V_1 和 V_2 按中频周期性轮流通断, 承受 $2U_d$, 经 T 降压, VD_1 、 VD_2 全波快速整流输出。一般只用于晶闸管式弧焊逆变器。

所使用的功率开关管类型不同, 逆变主电路基本结构相同, 但具体结构也有差异。

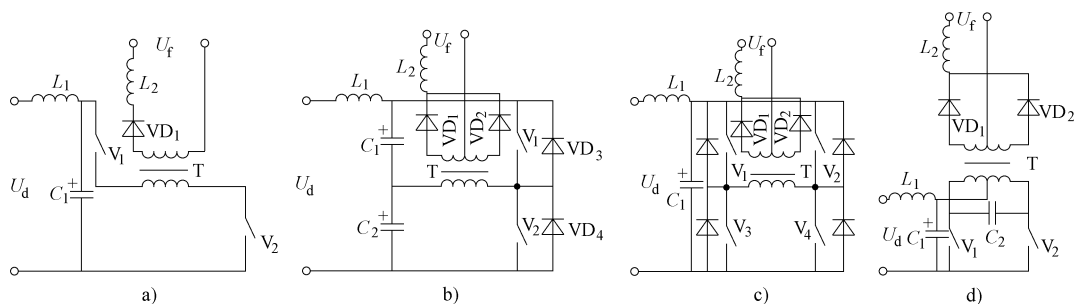


图 1-2-29 逆变主电路常用的基本形式

a) 单端通式 b) 半桥式 c) 全桥式 d) 并联式

4. 弧焊逆变器的控制驱动电路

电子控制系统实际上包括电子控制电路与驱动电路。

(1) 电子控制驱动电路基本功能的要求 主要有如下几点要求:

1) 能提供足够增益、前后沿适当陡峭 (但过陡易振荡)、相差 180° 、对称且符合 PFM 或 PWM 调节的脉冲列, 有电网和负载电流变化的补偿。

2) 能输出弧焊工艺所要求的外特性、调节性能、动特性和波形。

3) 能实现输入、输出电压的软起动, 按设计的次序接通和关断主电路、控制电路电源。

4) 限流、过载、缺相、温升等超过额定值时, 应能警示和自动限制、关断保护。

5) 设置与外围设备有联系的强电和弱电接口、遥控通信和输出输入反馈信号、远控信号的电隔离。

(2) 对晶体管类逆变器驱动电路的要求 把控制电路输出的脉冲放大到足以激励高压开关管。驱动脉冲幅度和波形, 直接影响晶体管类的饱和压降、存储时间、开通和关断瞬间集电极或漏极的电压、电流上升、下降速度等运行特性, 影响损耗和发热。根据功率开关管类型的不同, 有以下驱动电路。

1) 电流驱动电路: 用于输入阻抗较小的双极性晶体管 (GTR、BJT) 式。

2) 电压驱动电路: 用于绝缘栅单极型晶体管 (场效应晶体管 MOSFET) 和绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 式。为了可靠关断, 往往还需在控制极 (栅极) 施加反向偏压。

3) 触发电角控制驱动电路, 用于晶闸管类弧焊逆变器, 与上述晶闸管式弧焊整流器要求同样。

5. 弧焊逆变器的特点和分类与应用

(1) 弧焊逆变器特点 功率开关管工作在二次侧, 开关频率 50Hz, 功率变压器、电抗器质量和材料占整机 $3/4$ 以上。根据变压器原理: $U = 4.44fNBS \times 10^{-8}$, 这就是说, 绕组 N 和铁心截面积

S 与频率 f 成反比: $1/f \propto NS$, 频率越高, 绕组圈数和铁心截面越小。50Hz 变压器的一次绕组需 3 个几百圈, 二次绕组需 3 个几十圈。而弧焊逆变器的功率开关管工作在功率变压器一次侧, 开关频率 20000Hz, 400 倍于 50Hz, 一次、二次绕组各一个, 且分别只需十多圈和二、三圈, 铁心又较小, 因此它带来一系列好处。

弧焊逆变器与传统弧焊电源比较, 具有如下显著的特点和优点:

1) 高效节能: 效率达 80% ~ 92%, 节电 20% ~ 35% (随负载变化), 空载损耗仅为传统十几分之一。

2) 质量轻、体积小: 中频主变压器的质量仅为传统变压器的几分之一, 体积仅为传统变压器的 1/5 ~ 1/3, 移动轻便。

3) 电气性能优良, 主要表现在以下方面。

① 频率很高, 焊接回路滤波的电感量和材料大为减少, 动态响应快, 更利于发挥电子电抗器的优势。

② 输入整流电路和输出回路中均有储能电容器, 减少无功损耗和提高效率因数约 1 倍以上。

③ 控制性能优良: 无论哪种类型弧焊逆变器的控制功率都较小, 特别是电压控制型, 其控制功率接近零, 适合用数字化控制和柔性、多功能、远距离控制。

4) 具有良好的弧焊工艺性能: 它采用了快速开关功率电子器件和电子、数字化控制电路, 利于适应各种不同的弧焊方法进行各种位置、各种材料的优质、少/无飞溅、成形好的焊接。

(2) 弧焊逆变器分类 从不同的角度可以有不同的分类, 常用逆变主电路功率开关器件主要包括: 晶闸管 (SCR) 式弧焊逆变器、晶体管 (GTR) 式弧焊逆变器、场效应晶体管 (MOSFET) 式弧焊逆变器、IGBT 式弧焊逆变器等。随着新功率开关器件的出现, 可分为 IGBT 式、GTO 式、SITH 式、MCT 式、MGT 式弧焊逆变器等。此外, 还可按输出电流种类、频脉高低、特性形状等进行分类。

(3) 弧焊逆变器应用 具有上述一系列的优越性, 输出焊接电流可达 1000A 以上, 几乎可取代现有的一切弧焊电源, 用于焊条电弧焊和 TIG 焊、MAG/CO₂/MIG/实心/药芯焊丝电弧焊、等离子弧焊与切割、埋弧焊、机器人弧焊等各种弧焊方法, 焊接各种金属材料及其合金, 特别是用在工作空间小、高空作业、需较多移动焊机、用电紧缺等场合。

2.5.2 晶闸管式弧焊逆变器

在 20 世纪 70 年代末就有晶闸管式弧焊逆变器的研究成果。20 世纪 80 年代初中期, 弧焊逆变器从中等容量发展到大容量; 从焊条电弧焊发展到 CO₂/MAG 焊、埋弧焊和电阻焊; 从直流发展到矩形波交流焊; 从电子控制发展到微机、数字化控制等, 逆变频率从几千到数万赫兹。20 世纪 80 年代后期, 由于它的频率低, 控制性欠佳, 有噪声, 功率因数低, 逐渐为后起之秀——场效应晶体管式、IGBT 式弧焊逆变器所代替, 但在世界上仍有一定地位。

1. 主要组成和工作原理

晶闸管式弧焊逆变器主要组成、结构形式和基本原理框图, 与图 1-2-27 和图 1-2-29 所示基本相同。其不同点是以快速开关晶闸管为逆变主电路的功率开关管; 采用触发控制驱动电路和“定宽调频”调节控制体制。下面以串联半桥式逆变主电路为例, 说明其结构原理特点, 如图 1-2-30a 所示。

当 VT₁ 导通、VT₂ 为关断时, C_{5,6} 经 VT₁、W₁ 放电 i_1' , $u_{C5,6}$ 逐渐下降至零, C_{5,6} 的电场能变成 W₁ 磁能; 磁能向 C_{5,6} 反向充电, 出现负 $u_{C5,6}$, 如图 1-2-30c 所示。与此同时, 输入整流器经 VT₁、W₁ 给 C_{7,8} 充电 i_1'' 。 $i_1' + i_1''$ 构成了 t_{1-2} 区间 (图中 1 ~ 2 时间间隔) W₁ 中的正半波 i_1 , 在 C_{5,6} 被反向充电后经 W₁、VD₃ 反向放电, 又由 T 释放磁能对其正向充电。 i_1' 的方向与前相反, 构成了 t_{2-3} 区间负半波 i_1 。在 t_{2-3} 区间随着 C_{5,6} 的反向放电及正向充电, $u_{C5,6}$ 由负变正为 U_T 。在 $u_{C5,6}$ 出现负区间使 VT₁

关断。 W_1 电流 i_1 只振荡一周。振荡电路能耗, i_1 正半波幅值比负半波大。等到 VT_2 导通 (在时刻 t_4) VT_1 关断, 工作过程与上述相似, $C_{7,8}$ 经 $\rightarrow VT_2$ 、 W_1 放电 (电流 i_2'') $\rightarrow T$ 释放磁能向 $C_{7,8}$ 反向充电, 出现 $u_{C_{7,8}}$ 负值, 使 VT_2 关断。与此过程同时 $C_{5,6}$ 充电 i_2'' 。 i_2' 、 i_2'' 与 i_1' 、 i_1'' 反向, 由 $i_2' + i_2''$ 构成 W_1 在 t_{4-5} 区间负半波 i_2 。同理, t_5 之后, i_2 变正, $u_{C_{7,8}}$ 由负增为正 U_T 。这样, 当 VT_1 和 VT_2 交替通、断一次, 就在 T 出现一个周波电流。周而复始, 不断循环, 每秒钟通断次数决定逆变器工作频率。

为使逆变器正常工作, 务必保证 t_{2-4} 和 t_{5-7} 时间间隔均大于晶闸管的关断时间 t_q 。

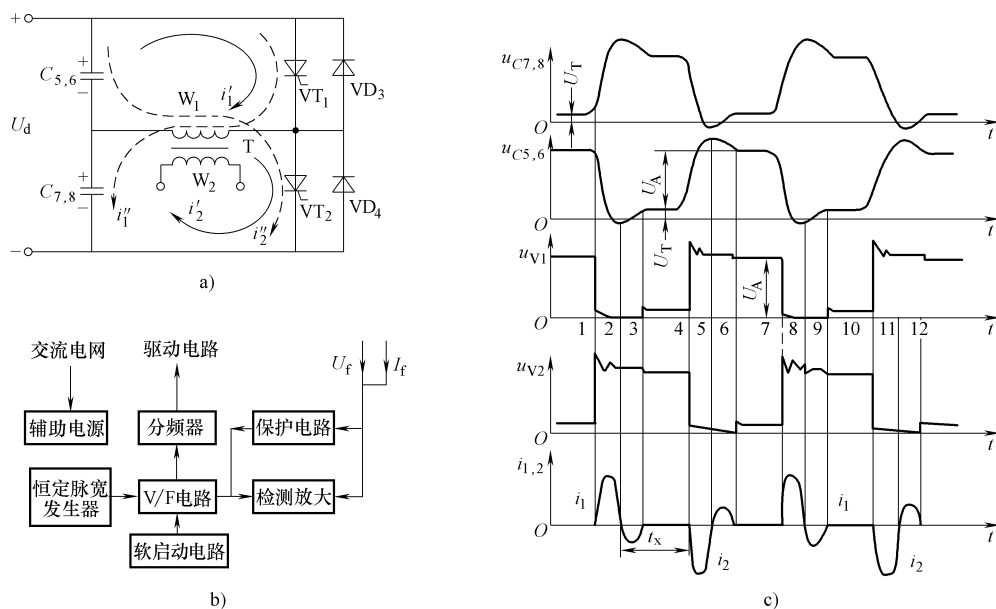


图 1-2-30 串联半桥式逆变主电路原理及其控制框图与波形图

a) 逆变主电路原理图 b) PFM 控制框图 c) 关键器件电流电压波形图

2. PFM 控制调节原理

图 1-2-30b 所示为 PFM 方式原理框图, 由稳压辅助电源、恒定脉宽发生器、“电压—频率转换”(V/F)、软起动、分频器、检测放大、保护电路等组成。由恒定脉宽发生器产生触发脉冲信号, 经“电压—频率转换”(V/F) 电路, 进入分频器和驱动电路, 获得相差 180° 两组触发脉冲信号, 实现对功率逆变转换、电特性和输出波形的“定宽调频”控制调节。

3. 应用与产品

晶闸管式弧焊逆变器的应用范围较宽, 从焊条电弧焊到 CO_2 /MAG/MIG 焊、等离子弧焊、埋弧焊和电阻焊; 从直流到脉冲焊、矩形波交流焊; 从电子控制到微机、数字化、智能控制均有应用。产品 ZX7—315、ZX7—400、ZX7—500、ZX7—630、ZX7—1000、ZX7—1250 系列具有相应规格的平特性、多特性型号。ZX7 系列的下降外特性如图 1-2-31 所示。

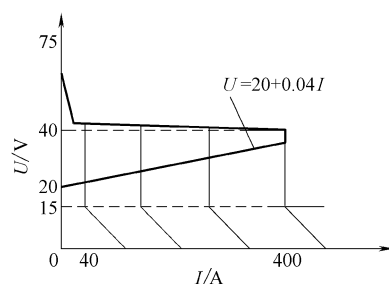


图 1-2-31 ZX7—400 弧焊逆变器的外特性

2.5.3 晶体管场效应晶体管式弧焊逆变器

1. 晶体管类弧焊逆变器原理特点及其分类

20 世纪 70、80 年代由晶闸管式弧焊逆变器先后发展到晶体管 (GTR)、场效应晶体管 (MOS-

FET) 和绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 式等, 均属晶体管类弧焊逆变器。从本质上来说, 可以追溯到前述的晶闸管式弧焊整流器以及晶体管式弧焊整流器, 均属开关型恒压、恒流弧焊电源, 都是借助于串、并联在二次侧负载回路功率开关管组的电压降落和通断时间比, 实现电气特性、参数、波形控制。存在低频, 耗电、耗材大等问题。晶体管类弧焊逆变器以性能更优的功率开关管组代替功率晶闸管, 工作在高电压低电流的一次侧, 逆变频率高达 $20 \sim 200\text{kHz}$ 。在图 1-2-30b 控制框图中, 采用“时钟振荡器”、“V/W 电路”分别代替“恒定脉宽发生器”、“V/F 电路”, 用 PWM “定频调宽”控制调制方式。根据控制电信号不同, 还可分电流控制型和电压控制型。它们的耐压能力不如晶闸管, 较少用于耐压要求高的并联式逆变主电路。

2. 晶体管式弧焊逆变器原理和特点

为了便于分析比较, 列举图 1-2-32a 所示的串联半桥式逆变主电路, 每个桥臂可用大功率晶体管单管承担半波工作, 逆变过程基本原理与晶闸管式基本相同。也可采用多只晶体管 (VT_1 、 VT_2 和 VT_3 、 VT_4) 分别串联均流电阻 (R_1 、 R_2 和 R_3 、 R_4) 并联工作, 利于降低成本、风险。 C_4 、 C_5 的电容量相等且电路对称, 即 $U_{C4} = U_{C5} = U_d/2$ 。 C_2 、 C_3 是高频干扰信号旁路电容; C_6 使正负半波波形对称; R_5 、 C_7 形成阻尼振荡, 减小集电极尖峰电压。集射两极间反向并联快速二极管 $VD_{1,2}$, 反向导通时箝位限制 $VT_{1,2}$ 、 $VT_{3,4}$ 的尖峰电压。上下桥臂晶体管组 (VT_1 、 VT_2 和 VT_3 、 VT_4) 轮流通断, 形成 $20 \sim 25\text{kHz}$ 的中频交流, 经中频降压器 T 降压和快速整流器整流输出以及闭环控制获得所需电特性和波形。图 1-2-32b 为晶体管的集-射极间电压 u_{ce} 、集电极电流 i_c 、基极电流 i_b 等波形, 属电流控制型。

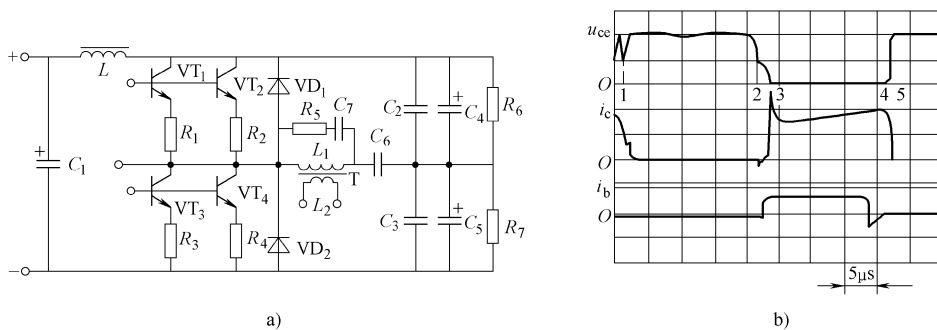


图 1-2-32 串联半桥式逆变主电路及其波形图

a) 串联半桥式逆变主电路及其波形图 b) u_{ce} 、 i_c 、 i_b 波形

3. 场效应晶体管式弧焊逆变器的原理和特点

晶体管式弧焊逆变器的出现, 虽然逆变频率较高, 利于提高效率、减小体积重量, 但存在二次击穿和需较大的电流驱动。1982 年我国访德学者黄石生教授在 D. Rehfeldt 教授指导下, 首先研发了性能更优的大功率场效应晶体管 (MOSFET) 式弧焊逆变器实验室样机 (1986 年专利号 85201941.6), 属电压控制型, 只需极微小通与关瞬时电流, 且开关速度更快 (逆变频率高达 $50 \sim 200\text{kHz}$)、无二次击穿、正温度系数, 多管并联无需串联耗电大的均流电阻, 耐冲击电流大, 效率、可靠性更高。但单管的负载能力较低, 需多管并联才能获得大中功率, 多用于中小功率焊接。图 1-2-33 所示为单端正激逆变主电路 (漏源电压 u_{DS} 、电流 i_D 、二极管 VD_1 的 u_{VD1} 、电流 i_{VD1} 以及控制电压 u_{GS} 、电流 i_G) 及波形图。其工作原理与前述图 1-2-29a 和相关文字说明基本相同, 还可通过两个单端正激逆变电路并联, 可成倍增大功率。

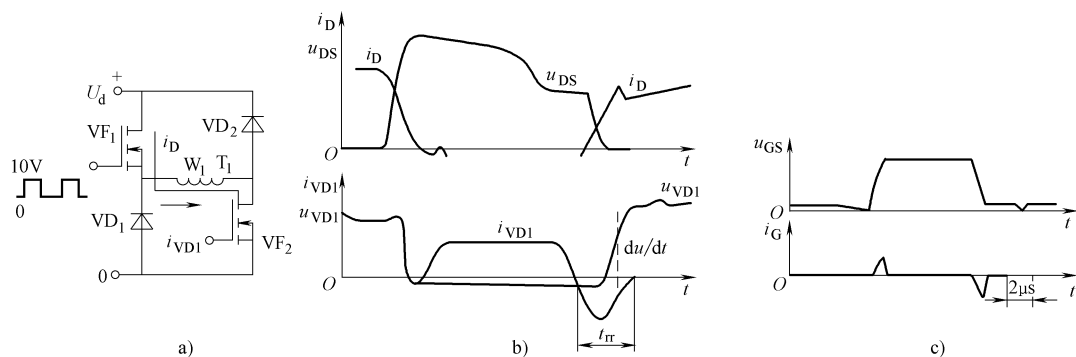


图 1-2-33 单端正激逆变主电路及波形图

a) 正激逆变主电路 b) u_{DS} 、 i_D 、 u_{VD1} 、 i_{VD1} 波形图 c) u_{GS} 、 i_G 波形

2.5.4 IGBT 式弧焊逆变器

20 世纪 80 年代末,把晶体管的大容量和场效应晶体管的电压控制、功率能力较小、开关性能优越等独特优点结合起来,克服各自的弊端,做成以场效应晶体管为控制端和以大功率晶体管为放大输出端的复合管“IGBT”。IGBT 式弧焊逆变器的功率开关管容量较大,综合性能更优,生产调试比较方便,大、中、小功率得到全面的推广和应用,正在成为弧焊电源的主导产品。

1. IGBT 逆变主电路原理和特点

IGBT 式弧焊逆变器的主要组成、主电路基本形式和基本原理框图与上述场效应晶体管弧焊逆变器等基本相同。主要的不同点为:IGBT 管代替场效应晶体管、晶体管;逆变频率为 20 ~ 25kHz,IGBT 管单管容量足够大,不必多管并联工作。以全桥式逆变主电路为例,介绍图 1-2-34a 所示的 IGBT 式弧焊逆变器。三相 380V 交流电压经全桥整流滤波后,送到 IGBT 全桥式逆变电路,如图 1-2-34b 所示,由 IGBT 组 VT_{1-4} 和变压器 T 组成。 VD_1 、 VD_4 与 VT_1 、 VT_4 反向并联,承受负载产生的反向电流,保护开关管。4 个缓冲(吸收)环节(R、C、VD)用于避免 4 个开关管在关断时过高的电压上升速度(du/dt)和减少管子的关断损耗。在此电路中,桥臂对边上的两只 IGBT 如 VT_1 、 VT_4 或 VT_2 、 VT_3 ,同时导通和关断,对边上的两对功率管交替通断,相位差为 180°,产生中频(20 ~ 25kHz)交流,经二次绕组带有中间抽头的中频变压器降压和整流、滤波后送到电弧负载。借助 PWM 调制和只取电压负反馈,获恒压特性,如图 1-2-34c 所示。其他形状外特性形成原理等与前述类似。IGBT 的电压 u_{ce} 和电流 i_c 波形,如图 1-2-34d 所示,其负载参数分别为 160A、24V 和 620A、43V。

2. IGBT 逆变控制驱动原理和特点

(1) 控制驱动电路基本功能要求 除了以上所述,考虑到它的功率负载范围较大还需有如下要求:

- 1) 驱动电路还应具备一定的抗干扰能力,避免出现误导通或误关断的情况。
- 2) 驱动电压 + U_{GE} 适当增加时,有利于导通压降 U_{CE} 和开通损耗下降,但负载短路时集电极 I_c 增加,且脉宽变窄,不利于 IGBT 安全,为此 + U_{GE} 应选其所需的最小值。
- 3) 合理取值反向驱动电压 - U_{GE} 为 -15 ~ -2V,利于可靠关断 IGBT。

(2) 控制电路原理 过去是采用分立元件进行控制,现在多采用单片集成芯片,电路基本结构形式如图 1-2-35a 所示,由时钟振荡器、V/W 电路、分频器、检测放大电路、保护电路、软起动电路和辅助电源等单元电路组成。前三个核心单元电路的功能常用 SG3562 等单片集成芯片实现,

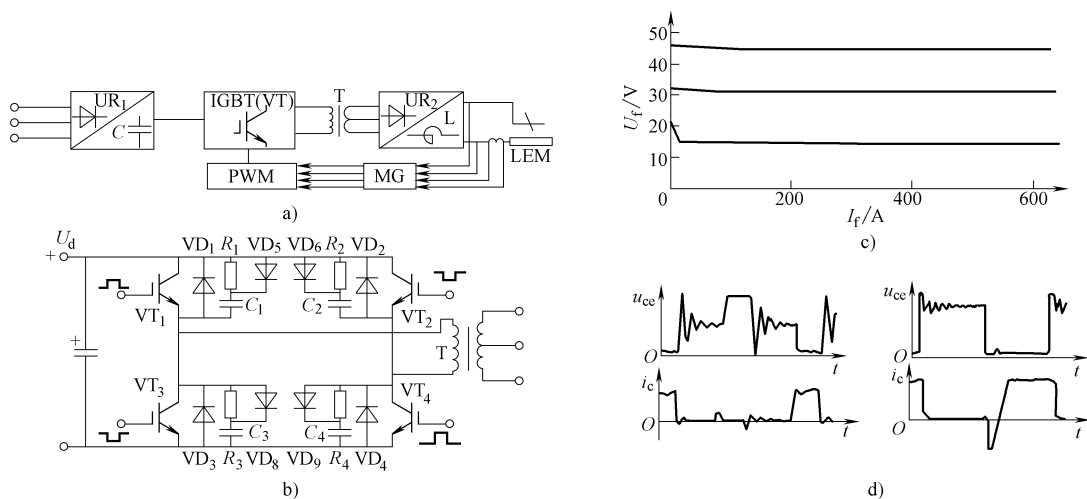
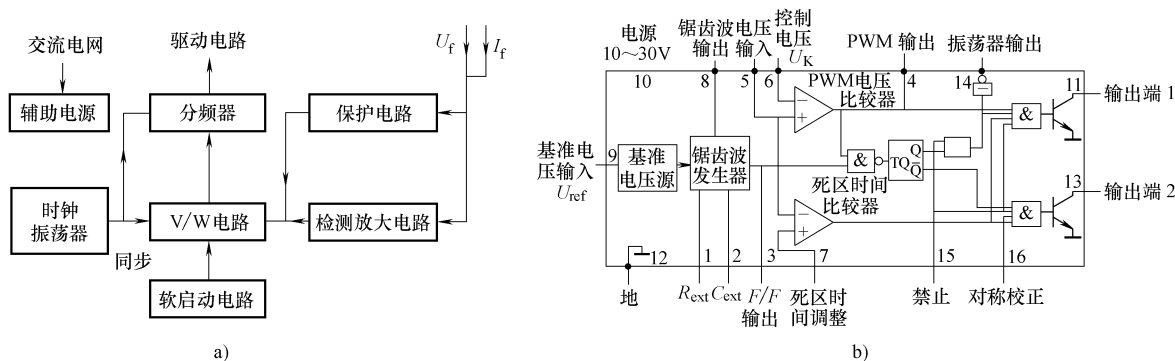
图 1-2-34 工作原理框图及其逆变主电路、外特性和 u_{ce} 、 i_c 波形图a) 工作原理框图 b) 逆变主电路 c) 外特性 d) u_{ce} 、 i_c 波形

图 1-2-35 定频调宽调制方式及其 W/3520 芯片结构原理框图

a) “定频调宽”调制方式原理框图 b) W/3520 芯片内部结构原理框图

其余的检测放大、保护、软起动电路和辅助电源等，作为该芯片的外围电路。为便于理解以 MC3420/3520 为例说明。

W/3520 芯片内部结构框图如图 1-2-35b 所示。由基准电压源、锯齿波发生器、PWM 电压比较器、死区时间比较器、TQ 触发器、分相器 &、输出级和与非门等模拟和数字电路组成。图 1-2-35b 中脚 10 外接图 1-2-35a 的辅助电源。脚 9 输入基准电压，向片内电路提供 7.8V 电压。锯齿波发生器产生幅度在 2.4~6.3V 的对称三角波，其中一路由脚 8 经脚 5 输入 PWM 电压比较器的同相端，另一路向与非门提供同步方波脉冲。可调范围为 2~100kHz，频率由脚 1、2 的外接电阻 R_{ext} 和电容 C_{ext} 决定。由触发器 TQ 等组成了分相电路，通过一对 &、脚 11、13 输出端 1、2，再外接耦合隔离驱动电路，去控制逆变主电路的两组 IGBT 交替通断工作。图 1-2-35a 的检测放大电路取样于主电路输出的 I_f 或 U_f 反馈信号，与图 1-2-35b 的 7.8V 基准电压比较放大后，获得的控制电压 U_K 从脚 6 输入 PWM 反相端，再与对称三角波比较，当 U_K 低于三角波电压时，PWM 比较器输出高电平，反之输出低电平。 U_K 在 2.4~6.2V 之间变化时，受控于 U_K 的 PWM 输出脉冲宽比和主电路 IGBT 双管交

替通断的占空比,均从45%变到0%。为了避免交替通断的IGBT同时导通,在图1-2-35b设置死区时间比较器。根据需要,由脚9基准电压 U_{ref} 分压经脚7输入电压,控制死区(即脉宽在半个周期内达不到的区域)大小,死区太小易产生共同导通。脚7还常用于软起动控制端,使输出脉宽由零逐渐升至设计值。图1-2-36a所示为在各种工作状态下,单片控制电路各部分电压波形时间关系。脚15提供禁止功能,当其电压为低电平约0.7V时,脚11、13两个输出脉冲及振荡器输出脚14的振荡立刻同时被强制截止。脚15还常用于超载、过热等安全保护信号的输入控制端。一般将脚16与4短接,输出端1、2的占空比均取决于PWM脉宽。如脚16外电路驱动,输出端2的占空比将独立于输出端1。

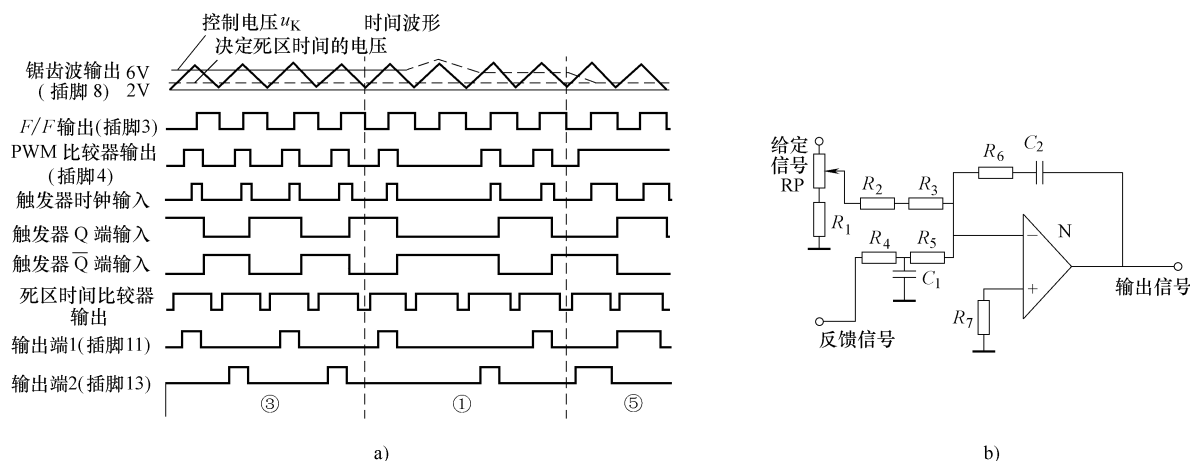


图 1-2-36 W3520 芯片各部分电压波形的时间关系和外特性获得原理图

a) W3520 芯片各部分电压波形的时间关系图 b) 外特性获得原理图

通过给定—反馈比较电路来实现外特性控制,如图1-2-36b所示,如用电压反馈可得到恒压特性,用电流反馈可得到恒流特性,电压或电流反馈信号经过滤波,与给定比较,其误差信号经过调节器调节和送到芯片3875,利用软开关逆变器的小信号模型对系统进行分析校正。还可用二阶或三阶系统的最佳整定法设计系统。

(3) 驱动电路原理 根据以上对驱动电路的要求,可设计各种形式驱动电路,常用的有快速光耦隔离驱动电路、脉冲变压器隔离驱动电路和专用IGBT驱动模块,如富士的EXB,东芝的TLP,IR公司的IR2110等。图1-2-37a所示为IGBT驱动电路基本形式之一,它由 VF_1 、 VT_2 、 VT_3 及 R_1 、 R_2 、 R_c 等组成。其中 VI 为光电耦合器,具有高速响应能力,没有 du/dt 引起的误动作、驱动功率小等优点。用于驱动的电压为 $\pm U_{CE}$ 、驱动电流为 I_c (只在开通和关断瞬间有窄脉冲电流)。IGBT各电量波形图如图1-2-37b所示。

此外,还有SEMIKRON—IGBTA40S驱动器和MOSFET式弧焊逆变器的几种基本驱动电路均可用。

(4) 过电流保护电路 图1-2-37c为过电流保护电路,集电极电压与栅门极驱动信号相比较的差值即为过电流信号,把它反馈至控制驱动电路,以适当快的速度切断栅门极信号,以保护IGBT。为保障IGBT式逆变主电路和驱动电路安全工作,利用图1-2-37d的功率驱动综合保护电路,可方便实现过电压、欠电压、过电流和过热等各种保护。一旦检测值超过给定值,保护电路发出两路信号,一路作为故障类别信号直接送入控制电路,另一路则引发中断,并将故障信号作为PWM封锁信号,用来封锁驱动信号,关闭功率器件。

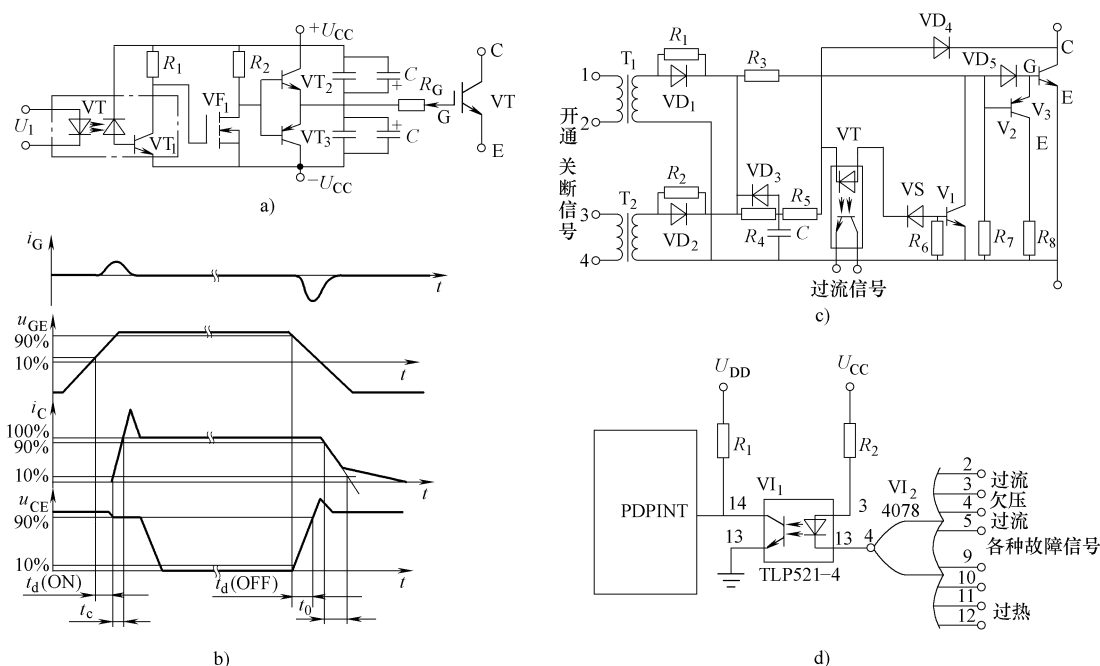


图 1-2-37 IGBT 式逆变器驱动电路和过电流保护、综合保护电路图

a) 驱动电路 b) IGBT 的 i_G 、 u_{GE} 、 i_C 、 u_{CE} 波形

c) 过电流保护电路 d) 功率驱动综合保护电路图

(5) 缓冲电路 为了防止过高的 di/dt ，需加缓冲电路，对不同容量 IGBT，采用的缓冲电路结构和参数不同，也可改变栅极串联电阻 R_G 来控制栅极 i_G 大小，减弱 IGBT 开通和关断过程对缓冲电路的要求。

3. 脉冲和矩形波交流输出原理

(1) 脉冲电流的产生原理 IGBT 式弧焊逆变器通过对 PWM 的低频调制，可获得按一定频率周期性变化时高（峰值）时低（基本值）脉冲焊接电流，如图 1-2-38a 所示。输出脉冲实际上就是给定信号 U_K 的放大。根据不同工艺特点的要求，可通过脉冲给定信号和取不同的负反馈信号，方便地切换所需外特性及其组合，获得脉冲峰值和基本值以及不同频率、占空比和任意波形。脉冲峰值和基值可通过四种外特性切换方法得到：

1) 峰值恒压 + 基值恒压 ($U-U$)：电弧自调节能力强，但峰值电流不稳定，熔滴过渡可控性差。

2) 峰值恒压 + 基值恒流 ($U-I$)：电弧自身调节能力强，峰值弧压稳定，基值电流恒定，不因弧压波动导致电流过小时熄弧，较多采用。

3) 峰值恒流 + 基值恒压 ($I-U$)：抗弧长干扰能力强，峰值电流不变，可对熔滴过渡进行精确控制和进行稳定的喷射过渡，电弧自调节能力差。

4) 峰值恒流 + 基值恒流 ($I-I$)：峰值电流稳定，能得到稳定喷射过渡，可对熔滴过渡进行精确控制，基值电流稳定不易熄弧，电弧自调节能力差，基值阶段会因弧长波动造成短路，较多采用。

(2) 矩形波交流电流产生原理 如图 1-2-38b 所示，在 IGBT 式弧焊逆变器的直流输出端，并联一个由 VT_1 、 VT_4 和 VT_2 、 VT_3 两对 IGBT 组成的全桥电路，在其桥臂对角线两端即可获得幅

值、频率、极性、电流比例等可调的矩形波交流电流，而且电流过零点的速度更快，电弧稳定性更高。

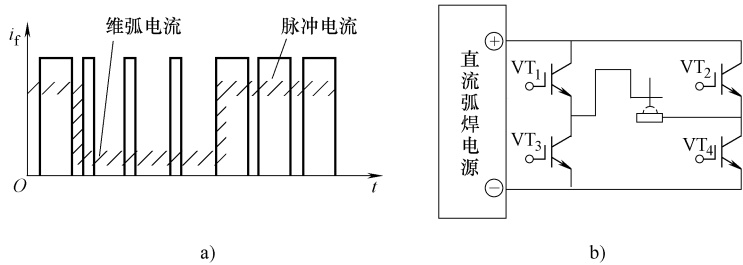


图 1-2-38 定频低频调宽获得脉冲及矩形波交流原理图
a) 定频低频调宽获得脉冲示意图 b) 矩形波交流原理图

4. IGBT 弧焊逆变器特点和应用

(1) 特点 IGBT、MOSFET 和 GTR 的特性比较见表 1-2-2。

表 1-2-2 GTR、MOSFET、IGBT 的特性比较

功率开关管	GTR	MOSFET	IGBT
驱动类型	电流	电压	电压
开关速度	$1 \sim 5 \mu\text{s}$	$1 \sim 0.5 \mu\text{s}$	$1 \sim 1 \mu\text{s}$
存储时间	$5 \sim 20 \mu\text{s}$	无	几乎无
高压化	容易	难	容易
大电流化	容易	难	容易
高速化	难	极易	极易
短路 SOA ^①	窄	宽	宽
饱和电压	极低	高	低
并联工作	难	很容易	容易
其他	有二次击穿限制 SOA	无二次击穿	擎住现象限制 SOA

① SOA 是功率开关管（如 IGBT、MOSFET 等）的安全工作区，即功率开关管所允许的工作电压、电流以及功耗的安全范围。

(2) 分类和应用

IGBT 式弧焊逆变器可按外特性分类，也可按输出直流、脉冲、矩形波交流分成相应的类型。这两类弧焊逆变器具有普遍推广的意义，不仅可用于量大面广的焊条电弧焊、钨极氩弧焊、熔化极气体保护焊、等离子弧焊接和切割，还可用于 1250 ~ 2000A 的大功率单/双丝埋弧焊工艺、碳弧气刨以及机器人电弧焊，双丝 MIG/MAG/脉冲焊、三丝埋弧焊等。1994 年华南理工大学黄石生教授团队成功地把 NBM—630A 型 IGBT 逆变式高频方波脉冲弧焊电源，应用于洲际导弹体高铝合金的高难度焊接新工艺。

2.5.5 软开关型弧焊逆变器

晶体管类弧焊逆变器有硬开关式和软开关式之分。上述为硬开关式，即功率开关管工作在被强迫关断（电流不为零）或强迫导通（电压不为零），甚至在较大值状态下，开关损耗稍大，且随频率增加而增加。而软开关型采用谐振变流技术，功率开关管在零电压或零电流条件下自然开通或关断，利于提高频率，从本质上克服硬开关式的缺点，是一种有较大发展前景的弧焊电源。

1. 软开关逆变主电路原理和特点

软开关型弧焊逆变器以逆变主电路形式来划分有单端、半桥和全桥三种基本形式，其基本原理大同小异，现以软开关 IGBT 式全桥弧焊逆变器为典型作重点介绍。

如上所述，移相全桥逆变主电路把 PWM 控制优点和软开关逆变器优点结合起来，在较大范围内实现了 PWM 控制，在开关瞬间实现功率开关管零电压开通。

图 1-2-39a 所示为软开关全桥逆变式主电路， $VT_1 \sim VT_4$ 为 IGBT， $VD_1 \sim VD_4$ 是相应 $VT_1 \sim VT_4$ 的反并联二极管， $C_1 \sim C_4$ 是相应 $VT_1 \sim VT_4$ 的输出电容。定义 VT_1 、 VT_2 为超前桥臂，领先于滞后桥臂 VT_3 、 VT_4 关断。每只管导通 180° ， VT_1 、 VT_3 管导通时刻不变，控制 VT_4 、 VT_2 导通时刻，使 VT_4 与 VT_1 同时刻相差 $0^\circ \sim 180^\circ$ ，当 VT_1 、 VT_4 移相 0° 时，输出最大。 VT_1 、 VT_4 移相 180° 时，无输出。 VT_3 与 VT_2 类似。从而为实现焊接参数调节和外特性曲线的形成提供了条件。其工作原理为：假定负载是感性负载，根据控制策略， VT_1 先导通， VT_4 经一定移相角后导通，电流方向通过 T_1 向负载输出功率。 VT_1 关断后，电容 C_3 先放电使 VT_3 两端电压为零后，由 VT_1 换流到 VT_3 ，此时处于环流阶段，开始方向为 $T_1 \rightarrow L_k \rightarrow VT_4 \rightarrow VD_3 \rightarrow T_1$ ；反向电流由 $L_k \rightarrow T_1 \rightarrow VT_3 \rightarrow VD_4 \rightarrow L_k$ ，滞后管 VT_4 在环流过程中电流保持一定的值，关断时，电流转移到另一个滞后 IGBT 的反向二极管，以实现滞后管的零电压开通。图 1-2-39b 为 $VT_1 \sim VT_4$ 的驱动波形和 T_1 一次 u_1 、 i_1 以及二次 u_2 的变化关系。

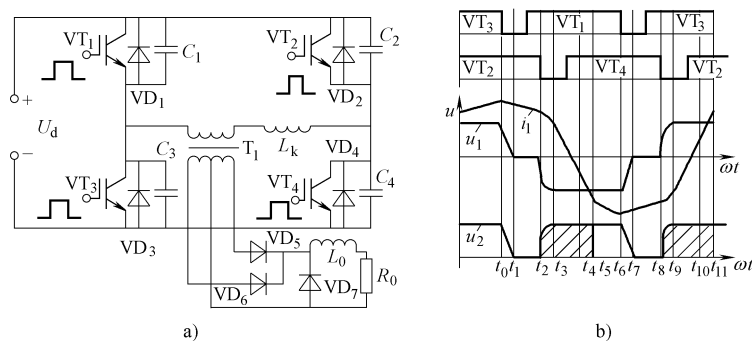


图 1-2-39 软开关全桥逆变式主电路及其 u_1 、 i_1 、 u_2 的波形图

a) 软开关全桥逆变式主电路图 b) u_1 、 i_1 、 u_2 的波形图

为解决滞后桥臂软开关范围窄问题，一是在 T_1 二次线圈两端各串入一个饱和电感分别与 VD_5 、 VD_6 串接，拓宽滞后管的零电压开通范围；二是在 T_1 一次线圈一端串入隔直电容 C ，使环流是一个 LC 的振荡过程，流过滞后管 (VT_4) 电流很快过零并且反向而关断。

2. 软开关逆变控制驱动原理和特点

控制电路原理与硬开关型大同小异，但控制信号可移相，下面以较多用的 3875 芯片为例作介绍。

这种专用移相继承控制芯片的内部电路如图 1-2-40 所示，有三角波发生器，误差放大器，基准电源，软起动电路，保护电路和四个驱动信号 A、B、C、D，如图 1-2-39b 所示的驱动关系：A、B 是超前桥臂上下管子驱动脉冲，相位反相，C、D 是滞后桥臂驱动信号，相位反相。A、D 有共同导通部分，B、C 有共同导通部分。这个共同导通部分是向负载传送功率部分，通过改变（移动）控制信号的相位，调节共同导通部分即可获得不同外特性，调节负载功率参数。给定信号与负反馈信号经过比较，其误差信号经过调节输出到 3875 误差放大器，误差放大器输出端与三角波通过比较器比较，所得输出电压经过内部处理，即可生成 4 个驱动信号。

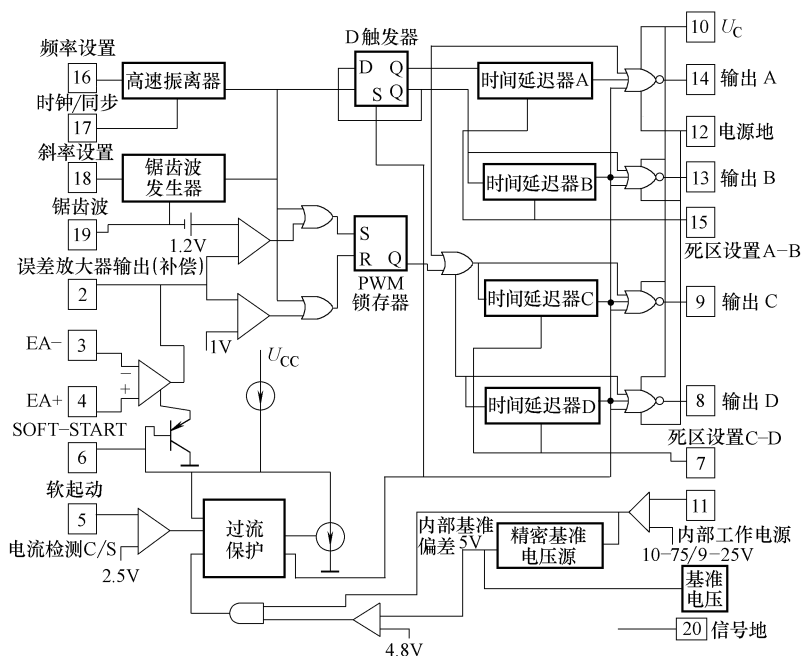


图 1-2-40 移相控制芯片 3875 原理图

2.6 弧焊电源的数字化控制

2.6.1 数字化控制的概述

1. 控制技术的发展

近几十年来计算机技术的迅猛发展，对弧焊电源的控制技术进步起到了积极的推动作用。弧焊电源的控制经历了由机械式、电磁式控制的粗放型到电子式、数字式控制的精确型的转变。弧焊电源数字化控制技术，按计算机技术及其出现先后分类，可分为单片微机控制、DSP 控制、ARM 嵌入式控制；按控制方法及其出现先后分类，可分为 PID 控制、模糊逻辑控制、人工神经网络控制等。弧焊逆变器实现数字化控制，充分发挥节能功率逆变与数字化控制技术结合的优势，显示两大现代特征的结合。

2. 数字化控制的功能模块

(1) 逆变主电路的数字化 弧焊逆变器的推广标志着弧焊电源的主电路从模拟到数字化的跨越，逆变主电路的功率开关管工作在 0 和 1 的数字开关状态。开关频率提高，响应速度更快，控制更精确。

(2) 控制驱动电路的数字化 以 DSP（数字信号处理器）或 MCU 为核心，根据弧焊工艺要求构建控制驱动通道，对给定信号流、故障、参数反馈流和网压信号流作综合处理与运算控制。

(3) 专家数据库软件系统 将专家的实验数据作为系统输入，固化到弧焊电源内部形成专家系统/数据库，使操作变得简单、方便。

(4) 人机界面 使用者需要根据被焊工件的材质、板厚、焊丝材料和直径、保护气体成分等对焊接参数进行调整，需要有设置软键盘和液晶显示或数码管显示的操作界面/面板，既简单方便又直观。

3. 数字化控制的特点

模拟控制存在的问题：电路设计的效率低，调试期长，控制精度低，可靠性较差。采用计算机技术以 0 和 1 的方式完成闭环数字化控制，高速 DSP/微处理器、软件及 IC 集成电路扮演了核心角色，实现了硬件向软件控制的过渡，通信能力较强。逆变主电路本身属数字式功率开关控制、大多数的数字化控制在弧焊逆变器基础上开发，通过软、硬件结合，除了实现电气特性“宏观”控制外，还进行焊接程序、参数优化匹配、波形变换、引弧、收弧过程等更“微观”、灵活、精密、柔性控制。它正朝着向高速、高精尖和智能化、多功能以及在线升级方向发展。其特点如下。

1) 多功能集成：通过数字控制器软件编程代替模拟式硬件电路，同一套硬件可实现不同焊接工艺、工件和焊丝材质、尺寸、保护气，选用不同控制策略、参数，实现多功能，工艺效果大幅度提高。模拟系统的配置和增益由阻容网络等硬件参数所决定，一旦确定就很难改变。而在数字系统中，这一切仅改变软件而已。

2) 接口的兼容性好：大量采用单片机、DSP 等数字芯片，便捷地与外部设备建立数据交换通道，实现大量的信息交换和网络化管理与监控等。

3) 具有更好的稳定性：模拟系统的阻容参数的容差、漂移导致温度稳定性、一致性较差，而数字化控制的信号处理或算法通过软件的运算来完成，稳定性、一致性好。

4) 具有更高的控制精度：模拟控制的精度由元件参数值和特性引起的误差所决定。而数字化控制的精度仅仅与模—数转化的量化误差及系统有限字长有关，高精度。

5) 便于功能升级：采用软件方式及在线编程技术实现焊接工艺过程控制功能，方便、快速升级。

数字化控制已经历了两个阶段：一是单片机控制，二是 DSP 控制。从某种意义上说，只有在弧焊电源进入到直接数字化阶段，才真正实现了数字化及其优势。

2.6.2 数字化控制的关键技术

1. 工艺时序控制技术

各种弧焊方法都要按照一定的工艺时序操作焊接过程，图 1-2-41a 所示为带高频引弧的 TIG 焊工艺时序流程图。焊枪开关接通电路后开始流程为：电磁阀开通 Ar 气→延时后高频引弧（成功后引弧器关断）→引弧电流出现短暂峰值后回到维弧电流→经过一段预热延时后缓升到焊接电流→焊接结束前电流缓降到维弧电流，经过一段延时后再降为零→送气阀经过延时后再关断。

图 1-2-41b 为 CO₂ 焊工艺时序流程图：焊枪开关接通→电磁阀开通 CO₂ 气→经过一段延时后提供空载电压→短暂延时后先缓慢送丝，焊丝与工件短路引弧→电流缓升到焊接电压→焊接结束前送丝速度、电流、电压都缓慢下降填充弧坑→延时后再关断 CO₂ 气，结束全过程。

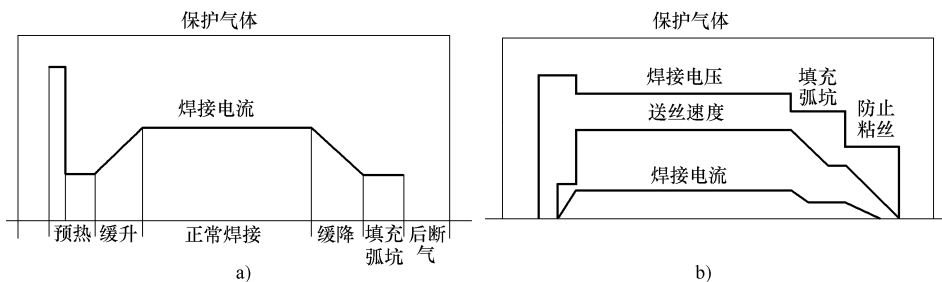


图 1-2-41 弧焊工艺时序控制流程图

a) TIG 焊（带高频引弧）工艺时序 b) CO₂ 焊工艺时序

2. 引弧收弧控制技术

不同的弧焊方法，引弧方式有所不同，而且对焊接过程稳定性和成形质量影响极大。TIG 焊一般采用高频振荡非接触引弧，电极不熔化，对数字化控制要求不高。MAG/MIG 焊采用接触引弧，焊丝产生复杂的熔化过程。如果引弧性不好，会产生焊丝爆断或使焊缝起点不好，收弧时又要求刚好填满焊缝终点的弧坑和焊丝末端小球尽可能小，否则再次引弧困难。为此，需通过数字化精密控制引弧、收弧过程。如图 1-2-42a 所示，采取高空载慢送丝引弧，引弧时空载电压维持有一段时间（但又不能太长），电流适当快速上升，引弧时间短，引弧顺畅，电弧声音柔和。如图 1-2-42b 所示，适当降低电压和减慢送丝收弧，使电流缓慢减少到零，让焊丝回烧以填平弧坑，减少弧坑裂纹、下塌等焊接成形缺陷，电流平缓降低，焊丝端部削小球效果好。

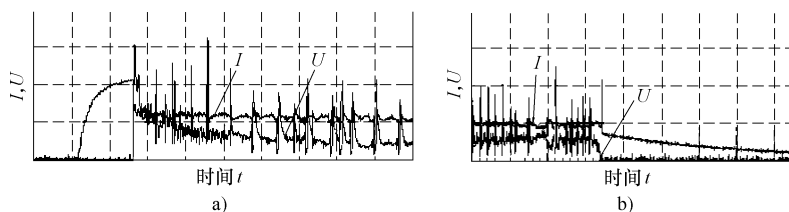


图 1-2-42 MAG 焊的引弧收弧过程示波图

a) 引弧过程 b) 收弧过程

3. 一元化控制调节技术

不同弧焊方法，电流和电压之间关系也不同。在某一焊接电流值下，有一个对应的最佳电压值，只有电流和电压合理搭配，才能使焊丝熔滴过渡最稳定。此种搭配关系可从大量焊接工艺试验得到，并可绘制出一条一元化曲线。通常采用电压优先的一元化参数调节。根据焊接材料和焊丝直径的不同，将弧焊电源电压给定信号按一定的比例变换后，作为送丝电动机的控制电压，使送丝速度和电流随输出电压增大而增大。

4. 脉冲波形与参数优化匹配控制技术

在 MAG/MIG 焊中，熔滴形成、尺寸、过渡模式和熔滴行为等是影响焊接工艺性能、焊缝成形和焊接质量的重要因素。典型的熔滴过渡模式有脉冲 MIG 焊的射滴过渡和 CO_2 焊的短路过渡。脉冲 MIG 焊的熔滴过渡形式为：多脉一滴、一脉一滴和一脉多滴，其中一脉一滴是所有过渡形式中最理想的一种，而它需要通过焊接参数之间优化匹配获得。脉冲焊的焊接参数较多，除了电弧电压、送丝速度和焊接速度外，还有峰值电流 I_p 及其前后沿上升下降速度、峰值时间 t_p 、基值电流 I_b 和基值时间 t_b 等，如第 1 章图 1-1-14 所示。国内外常用的脉冲数字化控制方法有 Synergic 控制法、脉冲门限控制系统、QH-ARC 控制法、闭环控制法、综合控制法、中值波形（在两个峰值间加入中值）控制法。

5. 短路过渡波形控制技术

CO_2 焊用小电流焊接时，熔滴在电压较低、弧长较短的情况下，以短路过渡，燃弧与短路交替不规则周期性变化。焊接电流在其中起极其重要的作用，其大小及动态变化率既控制焊丝的熔化、熔滴过渡，又影响飞溅和焊缝成形。而焊接电流是输出特性和电弧特性综合作用的结果。已研究出各种有效的典型控制方法：恒压特性控制法、复合外特性控制法、波形控制法、脉冲送丝控制方法等。它们的实质是将焊丝熔化、熔滴过渡过程、飞溅、焊缝成形分别或分时予以控制。普遍关注的既简便又有效的方法，是直接对输出波形进行数字化控制，简称为波控法。波控法经历了从粗糙控制到精细数字化控制的发展过程。比较成功的是林肯公司的表面张力过渡（Surface Tension Transform, STT）。弧焊电源工作于短路过渡方式，在 CO_2 焊过程实时测量电压与电压变化率，在一个过

渡周期内根据不同电弧电压输出不同的焊接电流。STT 将短路过渡过程细分为七个阶段加以控制,即:短路前燃弧段 ($t_0 \sim t_1$)、液桥形成段 ($t_1 \sim t_2$)、颈缩段 ($t_2 \sim t_3$)、液桥爆断段 ($t_3 \sim t_4$)、重燃弧段 ($t_4 \sim t_5$)、燃烧段 ($t_5 \sim t_6$)、燃弧后期段 ($t_6 \sim t_7$),如图 1-2-43 所示。

STT 技术的另一个重要而全新的特点是焊接电流与送丝速度无关,可以在大幅度减少飞溅和烟尘的同时更好地控制热输入,得到合适的熔深和完美的背面成形。

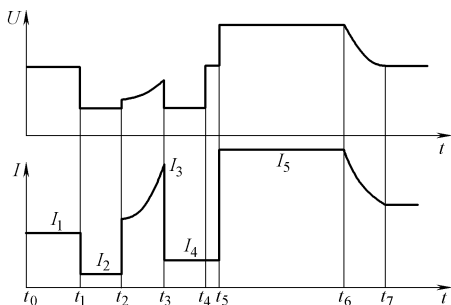


图 1-2-43 CO₂ 焊 STT 的电压、电流变化曲线

2.6.3 弧焊电源的单片控制

弧焊电源的数字化控制,以单片机、DSP (数字信号处理器)、ARM (Advanced RISC Machines, 通用的 32 位微处理器) 嵌入式微处理器为控制核心,通过软件编程实现弧焊工艺过程控制。这里首先介绍单片机控制,它有 3 个基本功能,分别为数值计算、数值分析、实时控制。它通过不同控制算法可获得各种外特性,通过编程可实现任意复杂工艺顺序控制,采用各种控制算法实现焊接参数最优控制和匹配,利用现场通信技术可进行双机协同控制,实现双丝高速焊接,通过以太网 IP 接口技术可实现远程管理、维护和升级。它便于调试和生产,成本低。

1. 系统组成及其功能

图 1-2-44 所示为弧焊逆变器的单片机控制原理框图,由模拟量输入输出通道、数字开关量输入输出通道、键盘输入和数字显示输出通道、通信接口等组成。

- 1) 模拟量输入通道:焊接电压、电流、速度等实值检测输入通道。
- 2) 模拟量输出通道:焊接电压、电流、速度、送丝速度及备用通道。
- 3) 开关量输入通道:用于检测过电流、过电压、过热、缺相和风机停转等各种故障信号。
- 4) 开关量输出通道:用于起动、应答、送气、送电、引收弧、送丝及停止、故障报警等程序控制。
- 5) 通信接口:与机器人、专机或 PC 微机通信的串行接口,有 SPI、I²C 以及高速 CAN 总线通信。
- 6) 人机接口:键盘显示、参数给定等。

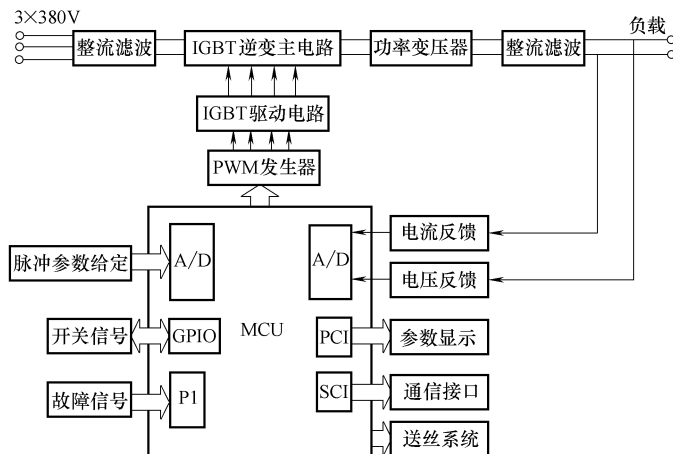


图 1-2-44 弧焊逆变器的单片机控制原理框图

2. 单片机控制原理

单片机控制原理：由键盘直接输入脉冲参数，或借助多圈电位从基准电源取得电压信号，并经过 A/D 转换输入焊接过程数字参数，然后通过键盘或控制开关发出焊接指令，单片机连接上弧焊逆变器、送丝机、保护气体等有关控制通道，并发出提前送气指令，然后发引弧指令，引弧成功后，单片机自动把电流从小递增到预定值。若是 TIG 焊，焊接电流通过电流反馈实现恒流特性控制。若是 MAG/MIG 焊，单片机控制系统通过对电弧电压、焊接电流信号的采集比较，使焊丝速度和电弧电压调节到预定焊接参数。如需预热，待工件预热到一定时间后，单片机发出起步行走指令，并输出一定数值的焊接速度信号，开始正常焊接，单片机实时数字显示焊接电流及电弧电压，自动进行焊接过程的参数变换。收弧时，单片机发出收弧指令，进行收弧处理（包括电流衰减、滞后送气等）。收弧完毕，单片机进入焊接结束状态，并关闭所有通道。若在焊接过程中或焊接结束后检测到故障信号，则以中断方式供单片机进行处理，中断一切工作，发出报警信息，并显示故障原因，以便操作者查找并排除故障，待故障排除后方可再次进行焊接。为了防止逆变主电路对控制电路的干扰，在信号采集输入和控制信号输出通道上都采用光电隔离和电磁隔离等措施。

2.6.4 弧焊电源的 DSP 控制

DSP 属于精简指令系统计算机（RISC），大多数指令都能在一个周期内完成，并可通过并行处理技术，在一个指令周期内完成多条指令。同时，DSP 采用改进的哈佛结构，具有分离的程序和数据总线，允许同时存储程序和数据；采用多级流水线和内置高速硬件乘法器，使其具有高速的数据运算能力。

近年来 DSP 在自动控制领域也获得广泛应用，DSP 芯片已经成为数字电路设计的主要方法。

弧焊电源的 DSP 控制，借助 DSP 实现控制算法和 PWM 信号发生电路的全数字化，完成电压和电流信号的反馈运算、PWM 波形的输出、系统实时监控及保护、系统通信等功能，其控制原理框图如图 1-2-45 所示。

基于上述思想，Fronius 公司推出了全数字化弧焊电源，随后 Panasonic 等公司也推出了各自的全数字化弧焊电源产品，并相继进入中国市场。国内在 20 世纪 90 年代初华南理工大学、北京工业大学等高校和科研单位就开始从事此项研发工作，并取得高水平成果和应用。全数字化弧焊电源实现了柔性化控制和多功能集成，具有控制精度高、系统稳定性好、产品一致性好、功能升级方便等优点。如 Fronius 公司的 Transplus synergic 2700/4000/5000 系列产品在一台焊机上实现了 MIG/MAG、TIG 和焊条电弧焊等多种焊接方法，可存储近 80 个焊接程序，实时显示焊接参数，通过单旋钮给定焊接参数和电流波形参数，可实现熔滴过渡和弧长变化的精确控制，还可以通过网络进行工艺管理和控制软件升级。

就控制系统结构而言，全数字化控制由单片机和 DSP 共同构成。单片机负责总体管理及给定参数的输出，而 PWM 信号产生和电流、电压的 PI 控制由 DSP 完成。与传统硬件电路构成的 PWM 信号发生器和 PI 控制器相比，基于软件方式的控制器灵活性更大，但成本较高，开发周期较长。

2.6.5 弧焊电源的 ARM 嵌入式控制

ARM（Advanced RISC Machines）是通用的 32 位微处理器，它是基于精简指令系统计算机

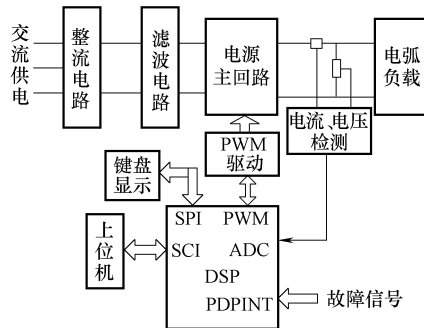


图 1-2-45 弧焊电源的 DSP 控制原理框图

(RISC) 构建的。ARM 微处理器已经遍及工业控制、网络系统各类产品市场, 基于 ARM 技术的微处理器应用占据了 32 位 RISC 微处理器 80% 以上的市场。采用 RISC 架构的 ARM 微处理器主要特点为: 小体积、低功耗、低成本、高性能; 支持双指令集, 很好地兼容 8 位/16 位器件; 大量使用寄存器, 指令执行速度更快等。

ARM 嵌入式技术在联网方面的优势, 为实现网络化控制奠定了基础。若单片机控制的弧焊电源具有网络功能, 可以与企业现有的网络信息系统无缝连接, 实现焊接过程的网络化管理与监控。这对于焊接质量控制和提高、焊接制造过程的敏捷性具有重要意义, 并使弧焊机远程故障诊断与维护成为可能。

ARM7 的优点是耗电少和成本低, 但 ARM7 最大执行速率不到 100MHz。它与 8051 之类的微控制器 (MCU) 类似, 但在功能上, ARM7 通常优于 MCU。ARM9 可以达到 180 ~ 200MHz 的工作速率, 应用范围也比较广。许多 ARM 芯片都具有网络控制功能, 从硬件的角度看, 以太网接口电路主要由 MAC 控制器和物理层接口 (Physical Layer, PHY) 两大部分构成, 目前常见的以太网接口芯片有 RTL8019、RTL8029、RTL8039、CS8900、DM9008 等。从网络化实现的技术可行性来看, 利用 ARM 嵌入式微处理器中的网络模块, 采用以太网网络通信技术, 在每台弧焊电源中内置 IP 地址, 可以通过 RJ45 接口直接连接到企业的 Intranet 网中。

2.6.6 弧焊电源的数字化智能控制

以模糊逻辑、人工神经网络和专家系统为标志的智能技术成为弧焊电源控制领域中的重要研究方向。

1. PID 控制原理

PID 控制是工业过程控制中应用最为广泛的一种控制方法。在单片机控制的弧焊电源中, 对于焊接参数的控制, 可以通过编程实现弧焊工艺参数的 PID 控制算法, 利用单片机强大的逻辑功能, 可以使 PID 控制更加灵活, 主要有以下三个技术环节。

(1) PID 调节算法 按闭环系统误差信号的比例、积分和微分进行控制的调节器称为 PID 调节器。它具有结构简单, 参数易于调整, 应用广泛等特点。理想 PID 控制算式如下:

$$u = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (1-2-35)$$

式中 u ——调节器输出控制量;

K_p ——比例系数;

e ——给定量与反馈量之间的偏差;

T_i ——积分常数;

T_d ——微分常数。

在采样时间 $t = kT$ (T 为采样周期) 时刻, 实际数字 PID 调节器的控制规律如下:

$$u(k) = K_p \left[e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i) + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right] + u(0) \quad (1-2-36)$$

式中 $u(0)$ ——控制常量, 其余参数物理意义与式 (1-2-35) 相应的参数相同。

(2) 数字 PID 调节参数选择 PID 调节器是一种线性调节器, 系统的给定值和反馈值的差成为偏差, 对偏差进行的比例、积分、微分线性组合构成控制量式 (1-2-36), 分别起比例、积分、微分等调节作用。

一般被控对象的数学模型很难建立, PID 调节参数的选择需要反复调试、修正, 才能找到比较理想的参数值, 对不同的控制系统也没有参考值可循, 但是可以根据上述 PID 调节作用原理, 对参数进行选择。

(3) 带死区的数字 PID 控制算法 焊接过程是一种非线性系统，采用 PID 调节的控制算法，由于积分饱和、系统干扰等原因，控制量的超调可能很大。为了避免控制量的过大或者过小，在应用中设置控制量的死区，对控制量设置范围进行限制，如式（1-2-37）所示，避免了系统过量的超调，增加了稳定性。

$$u_k = \begin{cases} u_{kmin} & u_k \leq u_{kmin} \\ u_k & u_{kmin} < u_k < u_{kmax} \\ u_{kmax} & u_k \geq u_{kmax} \end{cases} \tag{1-2-37}$$

2. 模糊控制原理系统组成及其功能

如图 1-2-46 所示，焊接过程模糊控制由模糊化、模糊推理和解模糊化三部分组成。模糊化的目的是将过程状态信息精确值转变为语言变量监督学习模糊子集的隶属函数。模糊推理利用模糊知识库中的模糊关系，推导出模糊控制动作的过程，可用 Zadeh、Mamdani、Sugeno、Larsen、Kosko 等模糊推理方法加以实现。解模糊化将模糊控制子集转变为确切的控制量输出。常用方法有最大隶属度法、最大值平均法、重量中心法和取中位数法。模糊控制过程如下：

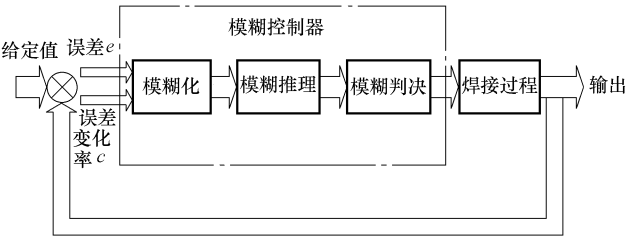


图 1-2-46 焊接过程的模糊控制原理框图

- 1) 将被控对象输出参数由精确量转换成模糊量。
- 2) 运用模糊逻辑对模糊量进行推理，做出决策，并输出模糊控制量。
- 3) 将这些模糊量再转换成精确量，调整被控对象。

3. 人工神经网络控制原理

在弧焊过程中，焊接电流、电弧电压、焊接速度、焊接材料、板厚等都对焊接质量有很大的影响。焊接前通常根据经验预置焊接参数，焊接后焊缝的质量则不可能用某一模型进行预测。近十多年来，国内外不少学者将神经网络用于弧焊过程的建模和控制。1990 ~ 1992 年 K. Andersen 等人用 BP 神经网络来离线和在线建立 GTAW 的模型，神经网络的输入层有 4 个节点，分别为焊接电流、焊接速度、弧长和板厚；输出层有 2 个节点，即焊缝的熔宽和熔深。1992 年美国的 J. Jones 将 BP 神经网络用于 GTAW 和 GMAW 焊接过程的建模，以输出量为焊缝的特性，如熔深、熔宽，控制量为焊接电压、电流、焊接速度和送丝速度，预测和获得期望的焊缝特性。1993 年华南理工大学把 BP 神经网络用于 TIG 焊，通过熔宽的检测与控制，实现了对焊缝质量的有效控制。TIG 焊的质量主要取决于焊缝的正面熔宽和背面熔宽，以它们作为控制目标，选择影响熔宽较大的焊接电流、电压、速度作为控制量，采用图 1-2-47 所示的三层 BP 神经网络来建立对象的静态模型。网络的输入层有 3 个节点：焊接电流 I 、电弧电压 U 和焊接速度 v 。输出节点有两个，分别为焊缝的正面熔宽 (B_f) 和背面熔宽 (B_b)，由实验获得的若干数据对 BP 网络进行若干次训练，从而可获得 TIG 焊的静态模型。当焊接速度、电弧电压不变，焊接电流增加，焊缝变

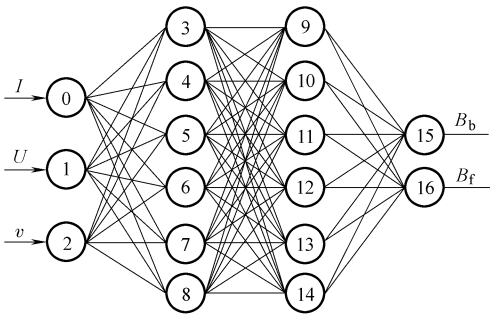


图 1-2-47 TIG 焊静态模型 BP 神经网络结构图

宽，原因是对试件的热输入随焊接电流的增加而增加。当焊接电流增大到一定程度，则使焊缝宽度尺寸变化趋缓并保持在一定限度上，焊缝成形均匀、美观。

神经网络建模及控制不同于其他建模方法，不需对焊接过程作任何假设，模型与实际过程符合较好，且简单易行。神经网络控制抗干扰能力较强，散热条件急剧变化时，输出基本保持恒定。对于非线性的焊接过程，神经网络的适应性强。但还需要提高神经元的集成度，使神经网络芯片中的神经元接近人脑的数量级。神经与模糊和专家系统的结合，可产生更大优势。神经网络的应用需要结合焊接工艺，不断实践。

2.7 弧焊电源的选择和使用

2.7.1 弧焊电源的选择

(1) 选择的一般依据 弧焊电源是决定电气性能的关键部分，不同类型的结构、电气性能、价格、用途等各有不同，在应用时要合理地选择，才能做到既经济又好，主要依据包括：焊接材料与工件材料，电流种类，功率大小，焊接方法，工作条件，节能要求，工件重要程度和经济价值等。参照表 1-2-3 所示性价比进行选择，从综合性价比考虑，除要求不高的焊接结构外，应尽可能采用节能性价比高的弧焊逆变器。

表 1-2-3 交直流弧焊电源技术经济性比较与用途

主要指标	弧焊变压器	弧焊整流器	弧焊逆变器
效 率	0.65 ~ 0.90	0.6 ~ 0.75	0.8 ~ 0.9
功率因数	0.3 ~ 0.6	0.65 ~ 0.70	0.85 ~ 0.99
空载功率因数	0.1 ~ 0.2	0.30 ~ 0.4	0.68 ~ 0.86
空载功率消耗/kW	0.2	0.38 ~ 0.46	0.03 ~ 0.1
制造材料消耗(%)	30 ~ 35	45 ~ 80	8 ~ 13
性价比	价低/性能低	价中/性能中	价稍高/性能高
每台占用面积/m ²	0.25 ~ 0.3	0.45 ~ 0.9	0.11 ~ 0.13
用途	酸性焊条/要求低的 TIG 焊/埋弧焊	碱性焊条/TIG 焊/CO ₂ 焊/ MAG 焊/MIG 焊/埋弧焊/等离 子弧焊等离子弧切割	碱性焊条/TIG 焊/CO ₂ 焊/MAG 焊/MIG 焊/埋弧焊/等离子弧焊/等 离子弧切割/机器人

(2) 根据工作条件和需要选择

1) 在水下、高山、野外施工等场合没有交流电网，应选用汽油或柴油发动机拖动弧焊发电机。

2) 对于热敏感性大的合金钢、薄板单面焊双面成形、管道及全位置自动焊，宜用数字化脉冲弧焊电源。

3) 要求较高的铝及其合金的 TIG 焊、多丝埋弧高速焊等，可选用矩形波交流。

4) 细丝等速送丝熔化极电弧焊、埋弧焊等，可选用恒压特性，其余一般选用下降特性。

(3) 功率的选择

1) 粗选容量功率：按所需焊接电流对照型号（如 BX1—300）后面的“300”来选择额定电流（300A）。

2) 计算选用额定容量功率：不同负载持续率 FS 下的许用焊接电流 I_f 、输入容量 S ，可由下列两式求出：

$$I_f = I_e \sqrt{\frac{FS_e}{FS}}$$

$$S = S_e \sqrt{\frac{FS_e}{FS}}$$

同样,用此两式根据需要的 I_f 及 FS ,即可确定选用多大额定容量 S_e 、焊接电流 I_e ,并由其允许温升确定,即在 FS_e 下,以 I_e 工作时,不会超过允许温升。对弧焊变压器而言,额定容量为一次额定 U_{1e} 、 I_{1e} 的乘积: $S_e = U_{1e}I_{1e}/1000$ (kV·A),输出功率 P 还与功率因数有关: $P = S_e \cos\Phi$ 。

2.7.2 弧焊电源的安装和使用

1. 弧焊电源的安装

(1) 焊条电弧焊电源的安装 除了弧焊电源外,还选配好焊钳、焊接电缆、工件电缆及其固定夹、熔断器等附件。同时一定要看懂使用说明书,并按要求依次安装和检查。接线时注意出厂铭牌上所标的一次电压是 380V 还是 220V 或两用。多台安装时,应分别接在三相电网上,以尽量求得三相负载平衡。

(2) 弧焊整流器、弧焊逆变器的安装 安装前必须检查绝缘情况,在高压检查前用导线将整流器或硅整流元件、功率管组短路,以防止其被过电压击穿。检查其内部是否有因运输而损坏或接头松动。动力线和焊接电缆的导线断面和长度要合适。要做到安全接地和接零。安装在通风好、干燥的场所,采取防潮措施。

2. 弧焊电源的使用

正确地使用和维护弧焊电源,不仅能保持工作性能正常,且能延长其使用寿命。

(1) 使用和维护常识

1) 使用前必须按说明书或国家标准对弧焊电源进行检查,尽可能了解其基本原理,掌握使用知识。

2) 仔细检查各部分的接线是否正确,是否拧紧,以防过热或烧损。

3) 空载运转时,首先听其声音是否正常,冷却风扇旋转方向是否正确。

4) 要建立内部清洁、检查、维修维护等的严格管理、使用制度。

(2) 合理并联使用 当一台弧焊电源功率不够时,可多台弧焊电源并联使用,但要注意均衡电流、极性问题。

2.7.3 弧焊电源的节电与安全

1. 弧焊电源的节电

弧焊电源是耗电量较大的电器设备之一,有“电老虎”之称。弧焊电源在焊接电流为额定电流的 70% ~ 85% 时效率最高,以此为据选购焊机,既节电省钱又能延长寿命。

提高功率因数,以减少网路无功功率损耗、增容和冲击,改善供电质量。

2. 弧焊电源的安全性

弧焊电源是电器设备,采取必要的安全措施,设法避免发生设备、人身事故。

1) 一般弧焊电源的空载电压为 60 ~ 90V,而焊工在高空作业和容器内施焊时,存在湿度危险,应避免接触带电器件。

2) 限制人接触到的电压值(空载电压最大允许值:控制电路的交流、直流电分别不得大于 36V、48V)。

3) 机壳接地或接零;设置防触电、节电功能的遥控、自动降低空载电压装置,穿戴橡胶手套、鞋帽等。

4) 产品要考虑抗电磁干扰环保问题。

5) 产品必须要有 3C 质量安全认证才能出售。

参考文献

- [1] 黄石生. 弧焊电源及其数字化控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] 赵嘉华. 焊接方法与机电一体化 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [3] 潘际銮. 现代弧焊控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] 黄石生. 现代焊接电源及设备 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1990.
- [5] Pan Jiluan, Ou Zhiming, Wu Zhiqiang, et al. Pulsed inert gas metal arc welding with feed back control. *Schweissen und Schneiden*, 1985, 37 (4): 54-55.
- [6] Ma, Cliff L, Lauritzen, et al. A simple power diode model with forward and reverse recovery. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1993, 8 (4): 342-345.
- [7] Hefner, Allen R. Jr. Diebolt, et al. An experimentally verified IGBT model implemented in the Saber circuit simulator. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1994, 9 (5): 532-559.
- [8] 黄石生. 逆变理论与弧焊逆变器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [9] 赵家瑞. 逆变焊接与切割电源 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [10] 吴林, 王麟书, 陈善本. 我国焊接行业的现状与发展趋势 [J]. 第八次全国焊接会议论文集 (第一册). 北京: 机械工业出版社, 1997: 28-37.
- [11] 潘际銮. 二十一世纪焊接科学研究的展望. 第九次全国焊接会议论文集 (第一册). 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 1999.
- [12] 黄石生, Rehfeldt. 弧焊逆变器的新发展一大功率场效应管弧焊逆变器 [J]. 焊接学报, 1983 (4): 72~78.
- [13] Huang Shisheng. Untersuchung der elektrischen Eigenschaften der MOSFET Inverterstromquellen zum Lichtbogenschweissen [J]. *Schweissen und Schneiden*, 1988 (7): 79-81.
- [14] 黄石生, 陆沛涛. 用于铝合金焊接的中频 MIG 焊逆变器与工艺研究 [J]. 机械工程学报, 1994 (30): 91~95.
- [15] 黄石生, 等. 效应管式弧焊逆变器: 中国, 85201941. 6 [P], 1986.
- [16] 黄石生, 等. 一种高频脉冲弧焊逆变器: 中国, 87216329. 6 [P], 1987.
- [17] 王志强, 黄石生, 伍月华. IGBT 弧焊逆变器: 中国, 90221541. 8 [P], 1990.
- [18] 王志强, 黄石生, 伍月华. IGBT 交流方波电焊机: 中国, 91219954. 7 [P], 1991.
- [19] 黄石生, 李阳, 陆沛涛, 等. 具有双闭环控制的软开关埋弧焊逆变电源. 中国, CN1438760A [P], 2003.
- [20] 王志强, 黄石生. 绝缘门极双极晶体管 (IGBT) 交流方波弧焊电源. 焊接学报, 1992, 13 (3).
- [21] 黄石生, 陆沛涛. 焊铝合金用 IGBT 交流矩形波弧焊逆变器, 电焊机. 1994 (4): 10-12.
- [22] 陈延明. 软开关弧焊逆变器及其特性的研究. 华南理工大学博士学位论文, 1998.
- [23] 胡汉才. 单片机原理及系统设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [24] 黄石生, 覃敬腾. TIG 焊熔宽的自整定 PID 闭环控制系统 [J]. 焊接学报, 1994, 15 (2): 122~129.
- [25] 陈强, 潘际銮, 等. 焊接过程的模糊控制 [J]. 北京: 机械工程学报, 1995: 86-91.
- [26] 黄石生, 贺剑峰, 等. 钨极氩弧焊焊缝熔宽模糊控制系统设计 [J]. 焊接学报, 1996, 17 (2): 94-97.
- [27] 黄石生. 新型弧焊电源及其智能控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [28] 宋天虎, 李敏贤. 先进制造技术的发展与焊接技术的未来 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [29] 华学明, 吴毅雄, 等. 数字信号处理器在焊接电源中的应用前景 [J]. 焊接技术, 2003, 32 (11): 2-5.
- [30] 黄石生, 李阳. 机器人用弧焊逆变器及设备智能控制的研究 [J]. 机械工程学报, 1993, 29 (4).
- [31] 艾盛, 等. PMIG 焊焊接电弧电压的模糊控制 [J]. 电焊机, 1999 (5): 1-5.
- [32] 周滴清, 黄石生, 等. Precision control of inverter welding power sources by using T-S fuzzy systems [J]. *China Welding*, 2007 (4): 72-76.
- [33] 黄石生, 李迪, 等. Weld quality control by neural network [J]. *Welding in the World*, 1994.
- [34] 李鹤岐, 李春旭, 等. 基于 DSP_ MCU 实现焊接电源系统数字化控制的设计 [J]. 焊接学报, 2005.

第3章 焊条电弧焊方法

焊条电弧焊（shielded metal arc welding）是弧焊方法中最简单、基本和应用得较多的方法之一。本章着重介绍焊条电弧焊原理与特点、弧焊电源、焊条选用及其焊接参数的选配，并简介焊接缺陷的产生与防止以及高效焊条电弧焊方法。

3.1 焊条电弧焊的原理及熔滴过渡

3.1.1 焊条电弧焊的原理及特点

焊条电弧焊是以焊条作为电极和填充金属，用手工操纵焊条进行焊接的电弧焊方法。焊接过程中，在焊条与工件之间建立起来的稳定燃烧的电弧，电弧高温将焊条与工件的局部熔化，熔化了了的焊芯以熔滴的形式过渡到局部熔化的工件表面，熔合在一起形成熔池。焊条药皮在电弧热的作用下产生气体和液态熔渣，起隔绝大气和保护液体金属的作用。随着电弧的移动，熔池金属逐步冷却结晶形成焊缝。焊条电弧焊方法原理示意图如图 1-3-1 所示。

焊条电弧焊与其他焊接方法相比，具有如下特点：

（1）应用范围广 焊条电弧焊通过选配不同类型的焊条，可以焊接低碳钢、低合金结构钢、耐热钢、低温钢、铸铁和铜、镍及其合金等。

（2）操作灵活和适应性强 焊条电弧焊能适应各种接头形式、焊缝位置、工件位置、工件厚度的焊接，凡是焊条能达到的地方，均能进行焊接。

（3）对工件装配要求相对较低 在焊接过程中，焊工通过手工操纵可以适时调整电弧长度、焊条角度、运条手法及焊接参数，从而对工件的装配要求相对较低。

（4）焊工水平对焊缝质量影响大 焊工的操作技能甚至精神状态对焊缝质量有着较大的影响。

（5）生产效率低 由于焊条电弧焊相对于其他熔焊方法，焊条承载的电流密度受限，使用的焊接电流偏小，焊接时需要经常换焊条与清理焊渣，自动化程度低，所以其生产效率低，焊工劳动强度大。

3.1.2 焊条电弧焊的熔滴过渡及其影响因素

焊条电弧焊的熔滴过渡是焊条端部形成的熔滴通过电弧空间向熔池的转移过程。

焊条电弧焊的熔滴过渡形态可分为短路过渡、渣壁过渡、喷射过渡与爆炸过渡。一些焊条在不同条件下往往具有多种过渡形态。

短路过渡是焊条端部熔滴与熔池短路接触，由于强烈过热或磁收缩的作用，使熔滴爆断而直接向熔池过渡的方式，碱性焊条和细直径焊条常用这种过渡方式。渣壁过渡是焊条端部熔化金属沿药皮套筒壁面向熔池过渡的一种形式，具有细熔滴和非短路的特点。喷射过渡是熔滴呈细小颗粒并以喷射状态快速通过电弧空间向熔池过渡的方式。爆炸过渡是焊条端部的熔滴或正通过电弧空间的熔

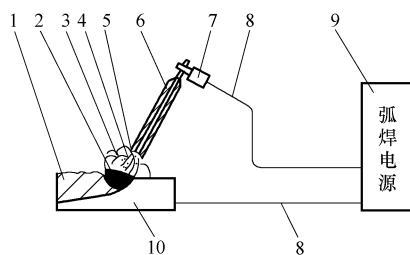


图 1-3-1 焊条电弧焊原理示意图

1—焊缝 2—熔池 3—保护气体 4—电弧
5—熔滴 6—焊条 7—焊钳 8—焊接电缆
9—弧焊电源 10—工件

滴,因其中气体膨胀,熔滴爆炸而形成的过渡方式,这种过渡带有强烈飞溅,严重恶化焊接工艺性,是要求避免的过渡方式。

熔滴作用力主要有重力、电弧力(电磁收缩力、斑点压力等)、熔滴爆破力与电弧气体吹力等。大电流时电弧力起主要作用,小电流时重力与表面张力起主要作用。熔滴作用力决定熔滴过渡形态而弧焊电源、焊条与焊接参数决定熔滴作用力。

影响焊条电弧焊熔滴过渡的因素及其影响方式主要有如下方面。

1. 弧焊电源外特性

焊条电弧焊时,一般是工作在电弧静特性的水平段上,采取下降外特性的弧焊电源便可以满足系统稳定性要求。

陡降的弧焊电源在电弧长度变化时,焊接电流静态偏差小,焊接参数稳定,电弧弹性好。但是电源外特性陡度过大时,短路电流偏小,造成引弧困难、电弧推力弱、熔深浅、熔滴过渡困难。如果弧焊电源外特性过于平缓时,短路电流过大,飞溅增大,电弧不够稳定,电弧弹性也差,所以焊条电弧焊应采用缓降特性的弧焊电源,并要求稳态短路电流与焊接电流之比在 1.25 和 2 之间。

焊条电弧焊也有采用恒流带外拖特性的弧焊电源。通过恒流特性使焊接参数稳定,通过外拖增大短路电流,改善引弧性能,提高电弧的熔透和熔滴过渡能力。还可以根据需要调节外拖拐点位置和斜率,使熔滴过渡有合适的推力,保证熔滴过渡稳定与焊接过程稳定,得到良好的焊缝成形。

2. 弧焊电源动特性

弧焊电源动特性是弧焊电源对负载瞬变的适应能力,是弧焊电源输出电压 u_f 与输出电流 i_f 相对时间的响应过程。其方程式为

$$\begin{cases} u_f = f(t) \\ i_f = f(t) \end{cases} \quad (1-3-1)$$

焊条电弧焊的电源动特性要考虑两个指标:一是瞬时短路电流峰值,包括由空载到短路和由负载到短路的情况;二是恢复电压最低值要求。所谓动特性好,一般指引弧和重新引弧容易、电弧稳定和飞溅少。就主观评定而言,是由人工试焊后作出的;就客观评定而言,是用仪器测定参数后按标准指标作出。随着电子控制、数字化控制技术的发展及其在弧焊电源中的应用,可以大幅度提高、改善弧焊电源的电特性,并且可以按要求对其进行任意调节控制。

对焊条电弧焊来说,只有当弧焊电源的动特性合适,才能获得良好的引弧、燃弧与熔滴过渡过程(即电弧稳定、飞溅少等)。另外,弧焊电源的空载电压、稳态短路电流、调节性能也要满足焊条电弧焊的要求。

3. 焊条直径的影响

焊条电弧焊熔滴过渡形态与弧焊电源、焊条及焊接参数有着密切的联系,影响着电弧稳定性、飞溅和焊条的熔化特性以及焊接过程稳定性。国外有学者提出弧焊电源(电流峰值 I_{fd})与焊条直径 ϕ 应当满足下列条件:

$$\begin{cases} I_{fd} \leq I_{lin} = f(\phi) \\ t_1 = 10 \pm 10 \times 30\% \\ t_2 = 300 \pm 300 \times 30\% \end{cases} \quad (1-3-2)$$

式中 I_{fd} ——由负载至短路的瞬时电流峰值,单位为 A;

I_{lin} ——瞬时短路电流临界值,单位为 A;当 $I_{fd} \geq I_{lin}$ 时,就可能出现严重飞溅;

ϕ ——焊条直径,单位为 mm;

$f(\phi)$ ——焊条与 I_{lin} 的关系;

t_1 ——熔滴短路时间,单位为 ms;

t_2 ——电弧燃烧时间，单位为 ms。

3.2 焊条电弧焊设备及焊条

3.2.1 焊条电弧焊电源设备选配

焊条电弧焊电源设备选配一般遵循如下原则：

- (1) 根据焊条种类与药皮类别 用酸性焊条焊接一般金属结构件可选用交流弧焊电源（如各类弧焊变压器）；用碱性焊条焊接较重要的结构钢应选用直流弧焊电源（硅弧焊整流器、晶闸管式弧焊整流器、弧焊逆变器），也可选用矩形波交流弧焊电源，既稳定又没有磁偏吹的影响。
- (2) 根据工件厚度与焊条直径 选用较大焊条直径时，应选用输入容量较大的弧焊电源，反之亦然。同时还要注意考虑负载持续率和额定电流大小等问题。详见本篇 2.7 节。
- (3) 根据施工现场有无交流电网 当焊接施工现场没有交流电网时可选用柴油机驱动直流弧焊发电机或越野汽车焊接工程车。
- (4) 根据节能减排要求 适应当前发展低碳经济的要求，实现制造过程节能减排、高效、省材、节电和性能优良的弧焊逆变器应用越来越广泛。
- (5) 根据焊接工位数 如在船厂等金属结构厂，焊接工位数多而集中，可选用多头式弧焊电源设备，有利于节电和减少占用场地，方便管理。

3.2.2 焊条的分类、特点及选用

焊条按用途分类，依据焊条国家标准和原机械工业部编制的《焊接材料产品样本》，通常可分为 10 大类。焊条型号与牌号的划分见表 1-3-1。

表 1-3-1 焊条型号与牌号的划分

焊条牌号			焊条型号		
序号	焊条分类(按用途分类)	代号 汉字(字母)	焊条分类(按化学成分)	代号	国家标准
1	结构钢焊条	结(J)	非合金钢及细晶粒钢焊条	E	GB/T 5117—2012
2	钎及铬钼耐热钢焊条	热(R)		E	GB/T 5118—2012
3	低温钢焊条	温(W)			
4	铬不锈钢焊条	铬(G)	不锈钢焊条	E	GB/T 983—1995
	铬镍不锈钢焊条	奥(A)			
5	堆焊焊条	堆(D)	堆焊焊条	ED	GB/T 984—2001
6	铸铁焊条	铸(Z)	铸铁焊条	EZ	GB/T 10044—2006
7	镍及镍合金焊条	镍(Ni)	镍及镍合金焊条	ENi	GB/T 13814—2008
8	铜及铜合金焊条	铜(T)	铜及铜合金焊条	TCu	GB/T 3670—1995
9	铝及铝合金焊条	铝(L)	铝及铝合金焊条	TAI	GB/T 3669—2001
10	特殊用途焊条	特(TS)			

焊条按熔渣的碱度可分为碱性焊条与酸性焊条。

焊条按药皮类型可分为氧化钛型、氧化钛钙型、钛铁矿型、氧化铁型、纤维素型、低氢型、石墨型、盐基型等。

可以调整焊条药皮配方，添加合金粉末，通过熔渣与熔化金属的冶金反应向焊缝添加附加的合金元素，改善焊缝金属的性能。

焊条的选用原则如下：

- 1) 等强度原则 使熔敷金属的抗拉强度与母材的抗拉强度相等，即从等强度角度选择满足力

学性能要求的焊条。如低碳钢、中碳钢、低合金钢焊条的选用。

低碳钢、中碳钢、低合金钢相互间形成异种钢焊接，一般按强度等级较低的母材选用焊条。

2) 等化学成分原则 使熔敷金属的化学成分与母材的化学成分符合或接近，以保证焊接接头要求的特殊性能，如不锈钢焊接、耐热钢焊接、堆焊等场合。

3) 考虑工件的复杂程度、刚度及工件的工作条件 工件承受冲击载荷、工件形状复杂或结构刚度大、工件承压（压力容器受压焊缝）等情况下尽可能选用力学性能好、抗裂性强的碱性焊条。在保证使用性能的前提下，尽量选用工艺性能好、价格相对便宜的酸性焊条。

4) 效率原则 对于焊接工作量大的结构，优先考虑采用高效率焊条，如铁粉焊条、高效率不锈钢焊条或重力焊条等。

3.3 焊条电弧焊工艺特点及其对焊接参数的要求

3.3.1 焊接工艺特点及要求

焊条电弧焊采用接触引弧，常用划擦法或碰击法。

焊条电弧焊时，焊件接弧焊电源的正极，焊钳接弧焊电源的负极，称为正接法；反之称为反接法。电弧中阳极温度高于阴极，所以一般情况下，碱性焊条或薄板焊接时采用直流反接，而酸性焊条采用正接。

一般酸性焊条烘干温度为 $75 \sim 150^{\circ}\text{C}$ ，烘干时间 $1 \sim 2\text{h}$ ；碱性焊条烘干温度为 $350 \sim 400^{\circ}\text{C}$ ，烘干时间 $1 \sim 2\text{h}$ ；焊条累计烘干次数一般不宜超过 3 次。

焊接工艺是与制造焊件有关的加工方法和实施要求，包括焊接准备、材料选用、焊接方法选定、焊接参数、操作要求等。焊条电弧焊工艺具有灵活与严格两重性。根据焊接结构件的材质、工作条件、形状与尺寸、焊接位置与焊接电源等条件的不同，焊条电弧焊的工艺也不同，还会由于焊工的操作习惯与操作技术不同有所变化。通常都要经过焊接工艺评定合格后确定焊接参数，并不得随意更改。

焊接工艺制定前要对设计图样的焊接工艺性进行审查，识别新材料、新工艺、新设备和特殊要求，提出试验项目、焊接工艺评定项目及焊工培训项目。

焊接工艺按其实施的时间先后顺序可分为 3 个阶段：

- (1) 焊接准备 包括坡口加工、焊条烘干、工件焊接前的热处理、焊工培训等。
- (2) 焊接过程控制 包括焊接设备选定、焊条选定、焊接参数选定、焊接顺序等。
- (3) 焊接完成后的工艺控制 包括焊后热处理、无损检测、焊缝表面处理等。

3.3.2 接头和坡口要求及设计

用焊接方法连接的接头称为焊接接头，简称接头。焊接接头由焊缝金属区、熔合区与热影响区组成。

根据焊件构成接头的方式以及接头的断面形状，焊接接头可分为许多种类，但一般最基本的是 4 类，分别为对接接头、角接接头、T 形接头、搭接接头。在各种焊接接头中，为了提高焊接质量与承载能力，较厚的焊件往往需要开坡口。对接接头有较高的承载能力，应力集中小，是最常见的接头形式；角接接头一般用于不重要结构的焊件，厚度 2mm 以下时常选用卷边形式，厚度较大及重要结构时需要根据焊件厚度与载荷等情况开坡口；T 形接头在钢结构中应用较多，其接头一般只承受较小的剪切应力或不受力，其缺点是可能造成应力集中，通过开坡口焊透消除根部间隙，可以降低应力集中；搭接接头易于装配，接头承载能力低，一般用在不重要的结构中。焊接接头的基本

形式如图 1-3-2 所示。

坡口是根据设计或工艺需要,将焊件的待焊部位加工并装配成一定几何形状的沟槽。坡口钝边的作用是防止烧穿,坡口根部间隙的作用是保证焊透。

根据坡口断面形状,坡口的最基本形式有 I 形坡口、V 形坡口、U 形坡口等。综合考虑单边坡口、双边坡口、钝边、垫板、组合等因素,衍生出种类繁多的坡口形式。对接接头坡口的基本形式如图 1-3-3 所示。

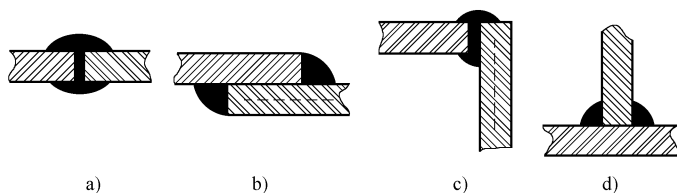


图 1-3-2 焊接接头基本形式

a) 对接接头 b) 搭接接头 c) 角接接头 d) T 形接头

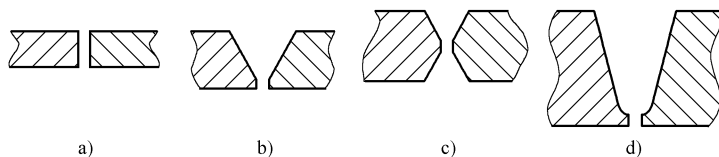


图 1-3-3 对接接头坡口基本形式

a) I 形坡口 b) 带钝边 V 形坡口 c) 带钝边双 V 形坡口 d) 带钝边 U 形坡口

焊接接头形式选择要考虑下列情况:焊件厚度、焊件结构形式、强度要求、焊缝金属化学成分、焊条消耗、坡口加工、焊接变形量、焊接生产率。

一般来说,焊件结构形式、焊件厚度与焊件强度要求决定焊接接头的形式;为了提高生产效率、减少焊接变形与焊条消耗量、调整焊缝金属化学成分以及保证焊件熔透等是影响坡口选择的要素。例如:优质的对接接头承载能力强,是应用最多的接头形式;焊件厚度相同时,U 形坡口空间面积比 Y 形坡口小很多,但其坡口根部圆弧加工比较复杂;双 Y 形坡口和 U 形坡口比 Y 形坡口极大地节省焊条用量,同时也减少了电能消耗、工时消耗及焊接变形。双 U 形坡口的焊条用量更少,焊接变形更小,但这种坡口加工较为困难,一般在较为重要的大厚度焊接结构中使用。

焊接位置是焊件接缝所处的空间位置,分为平焊、立焊、横焊和仰焊位置等。对接接头焊接位置如图 1-3-4 所示。

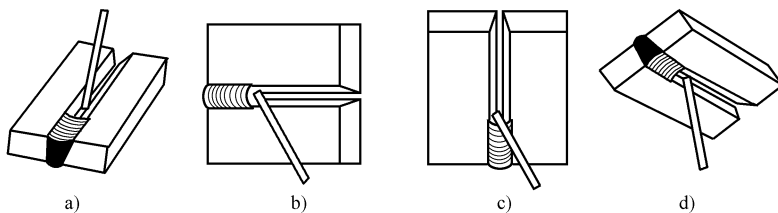


图 1-3-4 对接接头焊接位置

a) 平焊 b) 横焊 c) 立焊 d) 仰焊

水平固定管道进行的对接,包括平焊、立焊、横焊、仰焊等焊接位置。类似这样焊接位置的施焊,称为全位置焊。

焊接施工时应尽可能使焊件处在平焊位置,因为平焊时可以选择较大的焊接电流,生产效率高,焊缝成形美观,容易保证焊接质量,劳动条件相对较好,对焊工的操作技术相对要求较低。焊条电弧焊接头和坡口设计有下列国家标准可参考:GB/T 324—2008《焊缝符号表示法》;GB/T

985.1—2008《气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口》。

3.3.3 焊接参数的基本要求及其多参数匹配

焊条电弧焊焊接参数包括焊条牌号、直径、焊接电流与电弧电压、焊接速度、热输入、极性。

(1) 焊条牌号 按照等强原则、等化学成分原则及工件的复杂程度、刚度大小和工作条件来选择。

(2) 焊条直径 选择焊条直径通常要考虑工件厚度、焊缝位置、接头形式及焊接层次等因素。

(3) 焊接电流 选择焊接电流的最主要依据是焊条直径与焊接位置，其次有焊条类型、焊接层次等。焊接电流与焊条直径有如下关系：

$$I_f = kd \tag{1-3-3}$$

式中 I_f ——焊接电流，单位为 A；

k ——经验系数；

d ——焊条直径，单位为 mm。

表 1-3-2 焊接电流与焊条直径的关系

焊条直径/mm	1.6	2 ~ 2.5	3.2	4 ~ 6
经验系数 k	20 ~ 25	25 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 60
适用电流范围/A	25 ~ 40	40 ~ 80	100 ~ 130	160 ~ 300

表 1-3-2 只是一个参考数值，在实际生产过程中需要考虑其他因素加以调整。如立焊、横焊电流比平焊小 10% ~ 15%；仰焊电流比平焊小 15% ~ 20%；碱性焊条电流比酸性焊条电流要小。

(4) 电弧电压 焊条电弧焊的电弧电压主要由电弧长度决定，要尽量采用短弧焊。所谓短弧是指电弧长度是直径的 0.5 ~ 1.0 倍。用公式表示：

$$l = kd \tag{1-3-4}$$

式中 l ——电弧长度，单位为 mm；

k ——系数，一般为 0.5 ~ 1.0；

d ——焊条直径，单位为 mm。

立焊、仰焊时电弧长度要比平焊时短，碱性焊条比酸性焊条的电弧长度短。

(5) 焊接速度 在焊件对焊接热输入有严格要求时，焊接速度要与焊接电流、电弧电压一样，必须严格执行焊接工艺文件的规定，以保证焊接接头的性能。焊接速度应保持均匀一致，既保证焊透不烧穿又保证得到良好的焊缝成形和符合图样要求的焊缝尺寸。

(6) 热输入 热输入是焊接参数大小的综合考虑，指焊接热源输入给单位长度焊缝上的能量 (J/cm)。焊条电弧焊的热源就是焊接电弧。热输入一般用公式 (1-3-5) 表示：

$$Q = \eta I_f U_f / v \tag{1-3-5}$$

式中 Q ——热输入，单位为 J/cm；

I_f ——焊接电流，单位为 A；

U_f ——电弧电压，单位为 V；

v ——焊接速度，单位为 cm/s；

η ——焊接电弧有效功率系数。

焊接电流、电弧电压与焊接速度是决定焊缝形状与尺寸的主要参数，焊接电流增大时，焊缝的熔深和余高增大而熔宽略为增大；电弧电压增大时，熔宽增大、余高减小而熔深略为减小；焊接速度增大时，熔深、熔宽和余高都减小。

对不同的钢种，热输入的最佳范围不同，热输入过小或过大，会引起焊接接头塑性和韧性发生

变化，在许多场合，焊接工艺评定是必须的。

3.4 焊条电弧焊缺陷及安全与防护

3.4.1 弧焊缺陷的产生及防止

焊接接头中的不连续性、不均匀性以及其它不健全等的欠缺，称为焊接缺欠。

焊接缺欠的容限标准，按 IIW 第 V 委员会提出的，适用于使用目的的质量标准为 Q_B ，适用于质量管理的质量标准为 Q_A 。

平常所说的焊接缺陷多指不符合质量标准 Q_B 水平要求的缺欠，标志着需要返工、返修或报废。

弧焊缺陷分类、产生与防止措施见表 1-3-3。

表 1-3-3 弧焊缺陷分类、产生与防止措施

缺陷分类		缺陷定义	缺陷成因	防止措施
裂 纹	热裂纹	焊接过程中,焊缝和热影响区冷却到固相线附近的高温区时所产生的焊接裂纹;结晶裂纹在热裂纹中最为常见	焊缝中的硫、磷等杂质在结晶过程中形成低熔点共晶体并被推向晶界形成液态薄膜,在焊缝凝固过程拉应力作用下产生缝隙形成裂纹	1. 控制母材杂质含量;2. 降低熔合比;3. 控制焊接参数,适当提高焊缝成形系数;4. 采取降低焊接应力的措施,如焊前预热、焊后缓冷等
	冷裂纹	焊接接头冷却到较低温度下(对钢来说,在 M_s 温度以下)时产生的焊接裂纹。延迟裂纹在冷裂纹中最为普遍,危害甚大	延迟裂纹是钢的焊接接头冷却到室温后并经一定时间(几小时、几天甚至几十天)才出现的冷裂纹。产生冷裂纹有三大要素:焊接应力、母材的淬硬倾向、焊缝含氢量	1. 清除干净坡口表面和边缘两侧的油污、锈迹和水分;2. 采用碱性低氢型焊条;3. 按规定保管和烘干焊条;4. 焊前预热、控制层间温度和焊后缓冷;5. 合理的装配与焊接顺序
	层状撕裂	轧制的厚钢板角接接头、T 形接头和十字接头中,由于多层焊角焊缝产生过大的 Z 向应力在焊接热影响区及附近的母材内引起的沿轧制方向发展的具有阶梯状的裂纹	层状撕裂是冷裂纹的一种特殊形式,产生的原因是钢材轧制方向上存在大量的非金属杂质并且在板厚方向上出现拉伸应力	1. 控制钢中杂质含量;2. 重要结构采用抗层状撕裂的 Z 向钢(在板厚方向具有良好塑性变形能力);3. 从设计和工艺角度降低板厚方向的拉伸应力
	再热裂纹	焊后,焊件在一定温度范围内再次加热(消除应力热处理或其他加热过程)而产生的裂纹	焊件再次加热消除应力时,热影响区靠近熔合线处的金属晶粒处于过热状态而产生强烈脆化,热影响区的应变能力不能补偿消除应力的变形,从而导致晶界分离,产生再热裂纹	1. 选用再热裂纹不敏感材料;2. 合理选择消除应力热处理温度区间;3. 选用低强度高塑性焊条;4. 适当提高焊接热输入;5. 采用较高的焊前预热温度(200 ~ 450℃)
未焊透		焊接时,接头根部未完全焊透的现象	1. 坡口设计不合理;2. 焊接热输入不合理;3. 焊工操作手法不稳,电弧拉得过长	1. 坡口的角度、钝边与装配间隙要适当;2. 正确执行焊接工艺规程规定的焊接参数,在允许范围内取较慢焊接速度;3. 定位焊缝焊接电流要适当加大
未熔合		熔焊时,焊缝与母材之间或焊道与焊道之间,未能完全熔化结合的现象	1. 焊接时焊条倾角不当导致焊件边缘加热不充分;2. 坡口表面有油污或前道焊缝残存焊渣;3. 焊接电流太大导致后半根焊条熔化太快	1. 保证坡口面和坡口两侧边缘清理干净;2. 正确选择焊接参数;3. 焊接时注意调整焊条倾角,使焊条与母材金属被均匀加热和熔化

(续)

缺陷分类	缺陷定义	缺陷成因	防止措施
气孔	焊接时,熔池中的气体在金属凝固以前未来得及逸出而在焊缝金属中(内部或表面)残留下来所形成的孔穴	1. 坡口有油污、铁锈和水分;2. 焊接参数不当,如电弧过长导致空气入侵,热输入偏小导致气体来不及逸出等;3. 焊条受潮;4. 运条不当	1. 彻底清除坡口油污、铁锈和水分;2. 选择合适的焊接热输入,短弧焊接;3. 焊条使用前要烘干,不合格的焊条不要用;4. 运条方法要有利于气体逸出
咬边	由于焊接参数选择不正确或者操作方法不正确,沿着焊趾的母材部位产生的沟槽或凹陷	1. 焊接电流太大;2. 焊接速度太快;3. 电弧过长;4. 运条不当	1. 选择合适的焊接参数,如焊接电流、电弧电压、焊接速度;2. 运条时在坡口两侧稍作停留、采用短弧焊等
弧坑	电弧焊时,由于断弧或收弧不当,在焊道末端形成的低洼部分	收弧方式不当或焊接时突然断弧导致焊缝未能填满	采用合适的收弧方法,如稍作停留、回移收弧与划圈收弧等
夹渣	焊渣残留在焊缝金属中的现象	1. 坡口有油污、氧化物等;2. 坡口角度不当、焊接电流太小、运条不当;3. 焊接速度不当,太快导致熔渣来不及浮出,太慢导致熔渣超前;4. 多层多道焊时,层间焊渣未清理干净	1. 焊前彻底清理坡口油污、氧化物;2. 执行焊接工艺规程,如正确选择坡口角度、焊接参数等
焊瘤	焊接过程中,熔化的金属流淌到焊缝以外未熔化的母材上所形成的金属瘤	1. 焊接参数不当,焊接电流太大、电弧电压偏大、焊接速度太慢等;2. 焊工操作不熟练	1. 正确选择焊接参数;2. 运条时采用短弧焊并注意控制层间温度
焊缝形状与尺寸不符合要求	焊缝成形不良,几何尺寸不符合图样要求。如焊缝表面高低不平、焊缝宽度不一致、焊缝余高过大或过小,角焊缝焊脚尺寸过大或过小	1. 坡口设计或加工不当;2. 焊接参数不合理;3. 焊工操作不熟练	1. 按焊接工艺规程正确选择和制作坡口,正确选择焊接参数;2. 不断提高焊工技术水平

3.4.2 焊条电弧焊的安全及防护技术

焊条电弧焊过程中危害安全、健康与环境的主要因素有电击、弧光辐射、烟尘、有毒气体、金属飞溅、现场噪声等。在安全与防护技术中，一是要对危害因素进行预防并尽可能消除，二是要改善和优化劳动环境。

焊条电弧焊时，虽然电弧电压在 20 ~ 40V，但为满足引弧需要，空载电压常达 55 ~ 70V，在狭窄的金属物体空间或潮湿的场合，特别是换焊条时，如果焊工绝缘手套潮湿或劳保用品穿戴不符合要求，就有可能发生电击事故。

焊接电弧产生紫外线、可见光与红外线辐射。紫外线会灼伤皮肤、引起电光性眼炎；强烈可见光导致焊工眼睛昏眩与视力损伤；红外线对皮肤和眼睛均有害，大剂量的红外线长期照射，可使人失明。防护弧光辐射对眼睛伤害的主要措施是根据焊接电流正确选择电焊防护玻璃（俗称黑玻璃）。

焊接过程中产生气体、烟雾、灰尘等，其中的微粒（尤其是小于 3μm 的颗粒）可能会沉淀到焊工肺的深处，具有大的危害性。对焊工的短期影响表现为呼吸道的刺激、咳嗽、胸闷、金属蒸气所致的低热以及急性流感症状等；长期影响是可能导致焊工尘肺、锰中毒等。

焊接施工现场有许多的噪声源，如打磨、锤击、等离子弧切割、焊接部件传动与机器轰鸣等。焊工在噪声 90dB 中工作 8h 就会引起听觉神经系统的损害，而许多焊接现场的噪声强度常常达到 110 ~ 130dB 以上。防噪声的常用方法是带耳塞和耳罩。

焊条电弧焊主要安全防护技术措施如下：

(1) 焊接设备操作安全技术 电焊机及其附件(电缆、电焊钳等)都必须符合现行国家标准规定的安全要求。电焊机的工作环境应与焊机技术说明书规定的环境保持一致。电焊机的安装、使用、维护与保养应与焊机技术说明书的规定保持一致并符合相关国家标准要求。

(2) 要注意焊接车间/场所的通风 安装排气装置、焊接除尘器等,净化空气。

(3) 电焊工上岗前培训 焊工上岗必须接受专业安全理论培训和实际训练并身体健康,必须持证上岗。

(4) 焊工应穿戴劳动保护用品 在进行焊条电弧焊作业时,焊工应当按规定穿戴劳动保护用品。

(5) 制订作业安全与防护规定 进行焊接作业的单位,应当建立完整、有效的《焊条电弧焊作业安全与防护规定》。

3.5 焊条电弧焊的特殊方法

3.5.1 重力焊和躺焊的特点及操作

1. 重力焊特点与操作

重力焊是将重力焊条的引弧端对准焊件接缝,另一端夹持在可滑动的夹具上,引燃电弧后并随着电弧的燃烧,焊条靠重力下降进行焊接的一种高效率焊接方法。重力焊采用重力焊架进行半机械化焊接,具有设备简单、生产效率高、操作方便和减轻劳动强度等优点,主要应用于平角焊。

重力焊条较长,一般为500~1000mm,焊条引弧端涂有引弧剂以便自动引弧,滑轨下端有一弯头可以使焊钳反转,实现自动断弧完成重力焊的收弧过程。

调节焊架滑轨与焊缝的夹角,可以得到不同的焊脚高度,相应的焊缝长度也不同。

2. 躺焊特点与操作

躺焊是将焊条躺置在待焊坡口上,从一端引弧而焊条自动连续熔化进行焊接的一种电弧焊方法。为了使电弧定向地指向焊接部位,躺焊焊条具有特殊的断面。

3.5.2 高效焊条电弧焊方法

当前焊条的总体研发方向,包含了过去的高质量、高效率要求,还包含了对环境友好的节能减排性能要求,高效焊接方法与绿色环保焊接方法越来越重要。

在焊条电弧焊中,焊条的种类、规格等对焊接生产效率有着重大影响,高效率焊条包括两个方面:熔敷效率高和熔化速度快。下面介绍几种高效率焊条电弧焊方法。

1. 高效铁粉焊条

铁粉焊条是在焊条药皮中加入了一定数量的铁粉或金属粉,以改善焊条的焊接工艺性能,提高熔敷效率和熔化率。通常用熔敷效率130%来区分一般铁粉焊条和高效铁粉焊条。

铁粉焊条按药皮可分为铁粉钛钙型、铁粉钛型、铁粉氧化铁型和铁粉低氢型。

重力焊通常也采用高效铁粉焊条。

2. 连续焊条

连续焊条长度大于500mm,在药皮上等距离地开制了一定形状和尺寸的导电槽,是采用连续动态输电法进行高效率焊接的新型涂层焊接材料,具有焊接电流可调范围大的特点和优异的深熔特性。

连续焊条曾在国内外取得多项发明专利,由于连续焊条自身与焊枪制造技术及组织、资金运作等一些深层次原因,导致该项技术深入研究停滞。尽管如此,连续焊条仍在高效焊条电弧焊领域留

下了许多启示。

3. 高效不锈钢焊条

高效不锈钢焊条分为两类，一类熔化系数高，熔敷效率与常规不锈钢焊条相同；另一类熔敷效率高，熔化系数也高。前者采用新型渣系，使熔滴过渡形态由短路为主变为以喷射为主；后者主要是在药皮中加入了金属粉末以提高熔敷效率。高效不锈钢焊条国内外都有典型产品，国内的如 A102A、A202A 系列，国外的如日本神钢公司的 NCS 系列、荷兰飞利浦公司的 Philips316 等。

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会焊接分会. 焊接词典 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] 黄石生. 弧焊电源及其数字化控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] 王宝, 张文钺. 焊接电弧物理与焊条工艺性设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [4] 俞尚知. 焊接工艺人员手册 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1991.
- [5] 吴树雄. 电焊条选用指南 [M]. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [6] 张文明, 焦万才, 刘兆甲. 焊条电弧焊 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2007.
- [7] 曾乐. 现代焊接技术手册 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1993.
- [8] 应潮龙, 周国胜, 张孔群, 等. 实用高效焊接技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [9] 李淑华, 王申. 焊接工程组织管理与先进材料焊接 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

第4章 埋弧焊

埋弧焊 (Submerged Arc Welding) 是电弧在焊剂层下燃烧进行焊接的方法, 是焊接生产中应用最广泛的工艺方法之一。本章主要介绍埋弧焊的原理、设备及其电源电特性、焊接材料及其选配、埋弧焊工艺特点、缺陷及其防止方法, 并简单介绍高效高速埋弧焊技术。

4.1 埋弧焊工作原理及其特点与应用

4.1.1 埋弧焊工作原理

埋弧焊时, 焊丝通过导电嘴穿过覆盖在待焊区表面的颗粒状焊剂层, 与母材之间产生电弧。当电弧热使焊丝、焊剂和母材熔化并被部分蒸发后, 在电弧区便由金属蒸气和液态焊剂构成一个弹性外膜的空腔, 使整个空间与空气隔绝, 电弧就在这个空腔中稳定燃烧。空腔底部是熔化的焊丝和母材形成的金属熔池, 顶部则是熔融焊剂形成的熔渣。随着电弧向前移动, 电弧力将熔池金属推向后方并逐渐冷却凝固成焊缝; 密度较轻的熔渣覆盖在熔池的表面, 有效地保护熔池金属不被氧化, 冷却后凝固成渣壳覆盖在焊缝表面。焊接时焊丝连续不断地送进, 其端部在电弧热作用下不断的熔化, 焊丝送进速度和熔化速度相互平衡, 以保持焊接过程的稳定进行。埋弧焊的过程原理如图 1-4-1 所示。

埋弧焊焊剂的作用与焊条药皮相似, 埋弧焊过程中, 熔化焊剂产生的渣和气, 有效地保护了电弧和熔池, 同时还可起到脱氧和渗合金的作用, 与焊丝配合保证焊缝金属的化学成分和力学性能, 防止焊缝中产生裂纹、气孔等缺陷, 焊后未熔化的焊剂另行清理回收使用。

自动埋弧焊是埋弧焊的主要应用方式, 其焊丝的送进和电弧或焊件相对电弧的移动均由机械完成, 广泛使用, 因而通常把自动埋弧焊简称为埋弧焊。半自动埋弧焊的焊丝送进由机械完成, 而电弧的移动则由手持焊枪移动完成, 很少使用。不管哪种方式, 焊接时都要求被焊工件的定位要满足焊剂和熔池金属在凝固前必须保持在原位置, 有许多固定和定位装置可以保证这一要求。

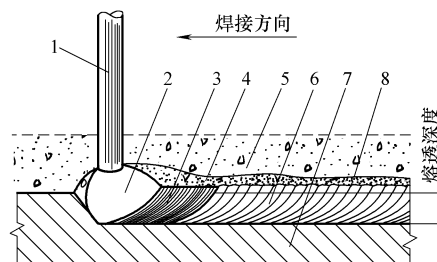


图 1-4-1 埋弧焊过程原理

1—焊丝 2—电弧 3—熔池金属 4—熔渣
5—焊剂 6—焊缝 7—焊件 8—渣壳

4.1.2 埋弧焊的冶金与工艺特点及其应用

1. 埋弧焊的冶金特点

埋弧焊时化学冶金反应主要是金属与熔渣之间的相互作用, 包括液态金属与液态熔渣、液态熔渣与已经凝固金属之间的作用。与焊条电弧焊比较, 埋弧焊的冶金过程有如下特点:

(1) 焊接区保护效果好 焊条电弧焊是利用焊条药皮中的造气剂形成一个气罩, 机械地将空气与焊接区隔开。埋弧焊所用的焊剂中不含有造气剂, 也就不可能形成气罩来隔绝空气, 而是利用焊剂在电弧热作用下形成一个熔渣膜, 有效地隔离空气进入电弧和焊接熔池, 保护焊接过程。从分析低碳钢埋弧焊焊缝金属中含氮量可知, 埋弧焊隔绝空气较焊条电弧焊要好, 焊缝金属中氮的质量分

数为 0.002%，焊条电弧焊焊缝金属中氮的质量分数为 0.02% ~ 0.03%。因此，埋弧焊时焊缝虽有明显的铸造组织，但仍具有较高的韧性，这首先与焊缝金属中含氮量低有关。

(2) 熔池持续时间长，冶金反应充分 埋弧焊时，金属处于液态的时间要比焊条电弧焊时间长几倍，使得液态金属与熔渣之间的冶金反应充分进行。主要发生的化学冶金反应如下：

1) 硅、锰还原反应及过渡：焊缝金属的硅、锰是由金属与熔渣作用而进入焊接熔池的。埋弧焊时的硅、锰还原反应在低碳钢埋弧焊时是焊缝金属中最重要的合金成分，提高焊缝的含锰量会降低产生热裂纹的危险性，并能改善焊缝金属的力学性能。硅能镇静熔池，并能保证取得致密的焊缝。当焊剂中 MnO 、 SiO_2 含量足够高时，下列冶金反应方程式可使焊缝金属的 Mn 、 Si 含量明显提高，使焊缝的抗裂性和力学性能提高。



因而，用高硅焊剂时通常使用低硅焊丝（含硅的质量分数最高为 0.05%），以防止焊缝金属含硅量过高。用高锰焊剂时，通常使用锰的质量分数 $\leq 0.5\%$ 的低锰焊丝。锰的质量分数为 2% 的高锰焊丝，通常与低锰或无锰焊剂配合使用。

2) 脱碳：高温下碳与氧的亲合力介于锰和硅之间，很容易被氧化烧损。由于焊剂中不含碳的成分，焊缝中的碳只能来自于母材和焊丝。因此埋弧焊冶金过程会造成一定量碳元素的烧损，且随焊丝中含碳量的增大而加剧。碳的剧烈氧化增强了熔池的搅动作用，使熔池中的气体易于析出，有利于防止氢气孔产生。但碳过量时会导致产生 CO 气孔。因此，埋弧焊用焊丝的含碳量必须严加控制，既要保证一部分碳的氧化，又不至于过多。

3) 脱氢：母材、焊丝表面的锈污及焊剂的吸潮水分是埋弧焊产生氢气孔的主要原因。为防止氢气孔，除杜绝氢的来源外，还可利用高温冶金反应时所生成的不溶于熔池的 HF 和 OH 来达到去氢的目的。

① 生成 HF ：当焊剂中含有大量 CaF_2 和 SiO_2 时，能发生如下反应



SiF_4 沸点只有 90°C ，在高温下呈气态并与气相中的氢原子和水蒸气发生反应



HF 在高温下比较稳定，且不溶于液态金属，因此能排出熔池。

② 生成 OH ：高温下，氢还能通过下述反应与氧形成稳定化合物 OH ，不溶于液态金属，也能排出熔池。



(3) 限制焊剂中硫、磷含量 硫会造成焊缝偏析形成低熔点共晶，是产生热裂纹的主要原因；磷会增加焊缝的冷脆性。焊缝金属含硫、磷量稍高可能导致冷裂、热裂倾向增大。控制焊缝金属含硫、磷量的主要途径是限制母材和焊接材料中的硫、磷含量。为此焊剂中含硫、磷量应严格控制质量分数在 0.10% 以下。

(4) 大热输入影响焊缝显微组织 埋弧焊在以大电流、低焊接速度焊接时，可能使热影响区的组织变粗，并降低焊缝的冲击韧度。

2. 埋弧焊的工艺特点

经过长期使用和不断改进提高，埋弧焊工艺有着显著的特点，既有突出的优点，也存在一定的缺点。其主要优点如下：

(1) 熔深大，生产效率高 与焊条电弧焊比较，由于埋弧焊机头导电嘴离待焊部位较近，焊丝导电长度短，所能承载焊接电流大，相应电流密度也大（见表 1-4-1），电弧的熔透能力和焊丝的熔敷速度都显著提高；同时由于焊剂和熔渣的隔热作用，电弧基本上没有热量辐射散失，热效率较高，从而提高了焊接过程的生产率。

表 1-4-1 焊条电弧焊与埋弧焊的焊接电流、电流密度的比较

焊条(焊丝) 直径/mm	焊条电弧焊		埋弧焊	
	焊接电流/A	电流密度/(A/mm ²)	焊接电流/A	电流密度/(A/mm ²)
2	50 ~ 65	16 ~ 25	200 ~ 400	63 ~ 125
3	80 ~ 130	11 ~ 18	350 ~ 600	50 ~ 85
4	125 ~ 200	10 ~ 16	500 ~ 800	40 ~ 63
5	190 ~ 250	10 ~ 18	700 ~ 1000	35 ~ 50

(2) 焊接质量好 由于熔渣的保护，熔化金属不与空气接触，而且熔池金属凝固较慢，有利于液体金属和熔渣之间的冶金反应以及气体的逸出，减少了焊缝中产生气孔、裂纹的可能性。焊接参数通过自动调节保持稳定，焊工操作技术要求不高，焊缝成分稳定，表面成形好。

(3) 劳动条件好 电弧在焊剂层下燃烧，没有弧光辐射，改善了工人劳动条件；机械化的焊接降低了工人的劳动强度。

(4) 节省焊接材料和电能 埋弧焊电弧熔透力强，对一定厚度的焊件，不开坡口也可焊透，单丝埋弧焊一次可熔透 20mm，同时没有金属飞溅损失，从而减少了焊接材料和电能的损耗。

埋弧焊存在如下主要缺点：

(1) 焊接位置的局限性 埋弧焊采用颗粒状焊剂进行保护，一般只适用于平焊和角焊。其他位置的焊接，则需采用特殊装置来保证焊剂对焊缝区的覆盖和防止熔池金属的流淌。

(2) 焊接板厚的局限性 焊剂的化学成分决定了埋弧焊的电弧弧柱电位梯度较大，电流小于 100A 时，电弧稳定性较差，通常不适宜焊接厚度 3mm 以下的薄板。

(3) 焊接场合的局限性 因使用焊剂，焊机机头上必须配备输送焊剂的装置。有些接头还需要引弧板和引出板。埋弧焊只适宜于长焊缝或固定位置焊接，短缝焊接时效率还不及焊条电弧焊。

3. 埋弧焊的应用

埋弧焊是应用最广泛的工艺方法之一。由于焊接熔深大、生产效率高、机械化程度高，因而特别适用于中厚板长焊缝的焊接。在造船、锅炉与压力容器、化工设备、桥梁、起重机械、工程机械、冶金机械以及海洋结构、核电设备等制造中都是主要的弧焊方法。

埋弧焊最适于焊接低碳钢和普通低合金钢。中碳钢及低合金结构钢应用埋弧焊时，常常需要预热、后热及注意焊丝与焊剂的选配。随着焊接冶金技术和焊接材料生产的发展，埋弧焊所能焊接的材料已从碳素结构钢发展到低合金结构钢、不锈钢、耐热钢以及一些有色金属材料，如镍基合金、铜合金的焊接等。

埋弧焊还可用于碳钢表面耐磨、耐蚀层的堆焊。

铸铁因其不能经受高热输入引起的热应力，一般不能用埋弧焊。但是也有球墨铸铁与低碳钢埋弧焊的应用实例。铝合金及镁合金因为其氧化特性，没有适用的焊剂，不能用埋弧焊。铅与锌的熔点低，不适于埋弧焊。

4.2 埋弧焊设备工作原理、分类及特点

4.2.1 埋弧焊设备的分类与组成

埋弧焊设备由弧焊电源、电气控制系统和焊机机身组成，典型的小车式埋弧焊机如图 1-4-2

所示。

按照使用电源、用途、电极数目及形状、送丝及行走方式，埋弧焊机每个部分都有多种不同结构及特点，其分类如图 1-4-3 所示。

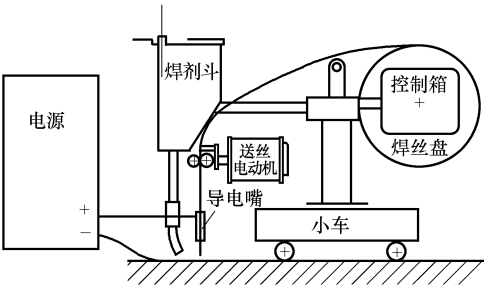


图 1-4-2 小车式埋弧焊机

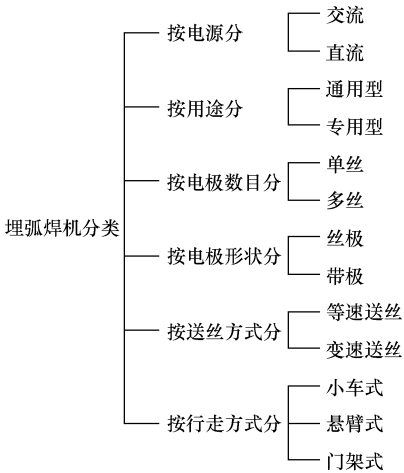


图 1-4-3 埋弧焊机分类

1) 按弧焊电源可分为交流、直流和交流与直流两用。一般弧焊电源的选择要根据使用条件，如焊接电流范围、焊接速度、焊剂类型以及丝极数目来选择。交流弧焊电源多用于焊接电流比较大或采用直流时产生严重磁偏吹的场合，直流弧焊电源多用于对焊接参数稳定性有较高要求，或焊剂稳弧性较差，或小电流范围、快速引弧、短焊缝、高速焊的场合。

2) 按用途可分为通用、专用弧焊设备两种。前者广泛用于各种结构的对接、角接、环缝和纵缝的焊接，后者只用于特定的焊缝和构件，如埋弧角焊机、T 型材焊机、埋弧堆焊机等。

3) 按送丝方式可分为等速送丝式和变速送丝式两种。前者具有电弧自身调节特性，适于细焊丝、大电流密度的情况；后者具有电弧电压反馈调节特性，适于粗焊丝、低电流密度的情况。

4) 按行走机构形式分为小车式、门架式、悬臂式三类。通用埋弧焊机多采用小车式，可适合平板对接、角接及筒体内外环缝的焊接；门架式行走机构则适用于大型结构件的平板对接、角接；悬臂式焊机可适用于大型工字梁、化工容器，锅炉锅筒等圆筒、圆球形结构上的纵缝和环缝的焊接。

5) 按焊丝数目和形状可分为单丝、多丝及带状电极焊机。焊接生产应用最广泛的是单丝焊机，为了加大熔深和提高焊接生产效率，多丝埋弧焊得到越来越多的应用，日前使用最多的是双丝和三丝。带状电极埋弧焊机主要用作大面积堆焊。

埋弧焊电源的发展经历了 4 个阶段：弧焊变压器、弧焊发电机（含磁饱和放大器式硅弧焊整流器）、晶闸管式弧焊整流器和 IGBT 式弧焊逆变器。其控制系统的发展也经历了 4 个阶段：机械控制、电磁控制、电子控制和数字化控制。目前大容量的数字控制晶闸管式弧焊整流器、埋弧焊逆变器以其高效节能、良好的动特性和弧焊工艺性能等优点成为常规埋弧焊电源的更新换代产品。随着电力电子技术的发展，埋弧焊设备的电路、器件及其控制技术向集成化、高频化、全控化、控制数字化以及多功能化的方向发展。在埋弧焊接过程控制方面，计算机被广泛运用于焊接参数的控制、焊件的自动定位和埋弧焊焊缝自动跟踪、埋弧焊的过程控制以及焊接生产线的自动化。

4.2.2 弧焊电源的电特性及其选用

埋弧焊通常是在高负载持续率、大电流下的焊接过程，因此一般埋弧焊电源都具有大电流、

100% 负载持续率的输出能力。

根据外特性曲线的形状, 埋弧焊电源有下降特性和平特性两种。

交流弧焊电源在单丝大电流埋弧焊或多丝串列电弧埋弧焊中均适用。用于交流埋弧焊的弧焊变压器, 要求其电流接近正弦波形, 电压接近矩形波形。在每半周波中极性变换一次, 并具有用以重新点燃电弧的峰值电压。交流弧焊电源具有下降特性。目前应用最多的主要是晶闸管电抗器式矩形交流弧焊电源, 其电流波形调节参数多、工艺适应性广, 电源工作相对可靠, 技术上也比较成熟, 但设备体积庞大、笨重、能耗高、效率低, 过零点的速度不理想等直接影响着交流电弧的稳定性。随着现代电气电子技术的发展, 已经研制成功 1250A 级大功率 IGBT 式矩形波交流埋弧焊逆变器, 体积减小, 控制精度和稳定性大幅提高。

埋弧焊电源选择必须考虑焊丝直径的粗细、自动送丝方式和焊接电流大小这三个因素。若用细焊丝 (如 $\phi 1.6 \sim \phi 3\text{mm}$) 且采用等速送丝方式, 宜选用平特性弧焊电源; 若用粗焊丝 (如 $\phi \geq 4\text{mm}$), 最好采用以电压反馈的变速送丝方式, 这时, 宜用缓降外特性弧焊电源。小电流 (300 ~ 500A) 焊接可用直流或矩形波交流弧焊电源; 中等电流 (600 ~ 1000A) 可用交流或直流弧焊电源, 如同体式弧焊变压器和大容量硅弧焊整流器等; 大电流 (1200 ~ 2500A) 宜用交流弧焊电源, 能减少磁偏吹。小电流焊接时空载电压为 65 ~ 75V, 大电流焊接时空载电压为 80 ~ 100V。

4.2.3 电弧调节系统及其工作原理

在埋弧焊过程中, 维持电弧稳定燃烧和保持焊接参数基本不变是保证焊接质量的基本条件。为了保持稳定的焊接过程, 首先要依据焊件属性和厚度、接头形式、焊丝直径及焊接位置等条件, 合理选择焊接电流 I_f 、电弧电压 U_f 和焊接速度等参数。如图 1-4-4 所示, 电弧过程的稳定状态, 即 I_f 、 U_f 的稳定值是由弧焊电源外特性曲线和电弧静特性曲线的交点 O 所决定的。在实际焊接过程中, 由于受到外界干扰, 弧焊电源外特性和电弧静特性都可能发生波动, 从而使 I_f 、 U_f 发生波动。

焊接过程中由于焊炬相对于焊道表面波动、送丝不稳定或弧柱电场强度的变化都可能引起弧长变化而造成电弧静特性发生波动, 使电弧稳定工作点沿弧焊电源外特性曲线移动 (见图 1-4-5), 弧长由 l_0 波动到 l_1 时, O_0 移到 O_1 ; 焊接电流由 I_0 增大至 I_1 , 电弧电压由 U_0 下降为 U_1 。

电网上大容量用电设备的启动和停止、用电负荷的不均衡等电网负载突变都可能引起电网电压的波动; 弧焊电源内部元件如半导体器件受热后, 也将使其输出发生波动。电源外特性发生波动将使电弧稳定工作点沿电弧静特性曲线移动, 如图 1-4-4 所示, 弧焊电源外特性由 D 波动到 D' 时, O_0 移到 O_2 。焊接电流则由 I_1 减小到 I_2 。

在这些干扰中, 弧长的干扰最为突出。一般弧长的数值仅为几到十几毫米, 弧长电场强度依电极材料和保护条件不同在 10 ~ 40V/cm 之间, 如果弧长发生 1 ~ 2mm 的变化, 电弧电压就会有明显的波动。而在实际焊接过程中, 弧长在小范围的波动几乎是不可避免的。

为了保证埋弧焊过程的稳定性, 必须采用调节系统来消除或减弱干扰的影响, 才能维持焊接电弧的稳定燃烧, 控制焊缝熔深和熔宽在允许的公差范围内。在埋弧焊生产中有两种自动调节方法, 一种是利用等速送丝系统的电弧自身调节作用, 通过改变焊丝熔化速度进行调节。另一种是利用电弧电压反馈来强制改变送丝速度进行调节。

1. 电弧自身调节系统及其工作原理

等速送丝系统在焊接过程中, 维持电弧稳定燃烧的基本条件是送丝速度 v_f 与焊丝熔化速度 v_m 相等:

$$v_f = v_m \quad (1-4-9)$$

在熔化极电弧焊过程中焊丝熔化速度 v_m 正比于焊接电流 I_f , 并随电弧电压 U_f (弧长) 的降低 (缩短) 而增加, 可表示为

$$v_m = k_i I_f - k_u U_f \quad (1-4-10)$$

式中 k_i —— v_m 随 I_f 变化的系数, 其值与焊丝电阻率、直径、伸出长度和电流值有关;

k_u —— v_m 随 U_f 变化的系数, 其值与弧柱电位梯度、弧长有关。

由式 (1-4-9) 和式 (1-4-10) 可得

$$I_f = \frac{v_f}{k_i} + \frac{k_u}{k_i} U_f \quad (1-4-11)$$

式 (1-4-11) 表示在等速送丝速度条件下, 弧长稳定时 I_f 与 U_f 之间的关系, 或者说等速送丝电弧焊的稳定条件, 通常称为自身调节系统静特性或等熔化曲线方程。

在给定的保护条件、焊丝直径、伸出长度情况下, 选定一种送丝速度和几种不同弧焊电源外特性曲线位置进行焊接, 测出每一次焊接过程的 I_f 、 U_f , 即可在 I 、 U 的坐标中作出自身调节系统的静特性曲线, 或称之为等熔化特性曲线。如图 1-4-5 所示, 电弧在该曲线上任何一点工作时, 所对应的 I_f 和 U_f 的组合条件下, 焊丝熔化速度不变, 且恒等于焊丝的送进速度, 见图中的 abc 曲线。

(1) 等速送丝自身调节精度 其精度与弧长波动、网路电压波动有密切关系。

1) 弧长波动时的自身调节精度: 如图 1-4-6 所示, 在埋弧焊过程中, 当弧长突然缩短, 电弧工作点从 O_0 点移动到 O_1 点时, 则焊接电流将增加, 焊丝的熔化速度 v_m 变快而使 $v_f < v_m$, 弧长将因熔化速度的增加恢复到 O_0 点的稳定状态。如果弧长波动时伴随有焊丝伸出长度的变化, 这时调节过程完成后, 系统的稳定工作点将由焊丝伸出长度变化后新的等熔化曲线和弧焊电源外特性曲线的交点决定, 这时调节系统存在静态误差, 如图 1-4-7 所示。系统静态误差大小与焊丝伸出长度变化量、焊丝直径及弧焊电源外特性陡度有关, 显然陡降外特性弧焊电源 (曲线 4) 比缓降外特性 (曲线 5) 引起的电弧电压静态误差大, 同理可知采用平硬外特性电源时, 产生静态误差较小。

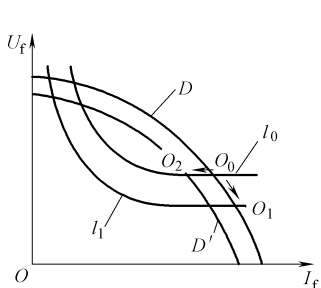


图 1-4-4 电弧静态工作点的波动

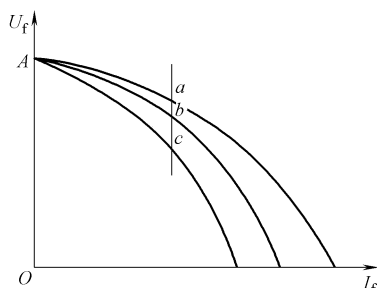


图 1-4-5 等熔化特性曲线

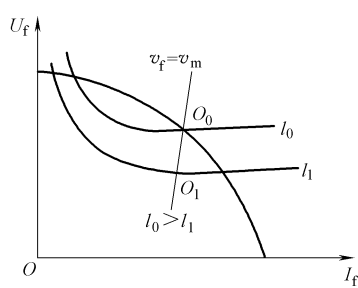


图 1-4-6 弧长波动时
电弧自身调节原理

2) 网路电压波动时的自身调节误差: 如图 1-4-8 所示, 网压波动将使等速送丝埋弧焊的工作点沿等熔化曲线从 O_0 移到 O_1 , 在长弧焊条件下, 这时系统将产生明显的电弧电压静态误差, 且陡降外特性弧焊电源 (曲线 1、2) 比缓降外特性弧焊电源 (曲线 4、5) 引起的电弧电压静态误差大。

(2) 等速送丝自身调节的灵敏度 在等速送丝埋弧焊过程中, 弧长波动是靠改变焊丝熔化速度的电弧自身调节作用恢复的。显然, 这种电弧自身调节弧长的恢复速度, 将取决于弧长波动所引起焊丝熔化速度变化量的大小, 如变化量越大, 弧长恢复就越快, 调节时间就越短, 自身调节灵敏度就越高, 反之亦然。

电弧自身调节灵敏度与下列因素有关:

1) 焊丝直径和电流密度: 当焊丝较细或电流密度足够大时, k_i 值足够大, 电弧自身调节作用就会很灵敏。每一种直径的焊丝都有一个能依靠自身调节作用保证电弧稳定燃烧的最小电流值, 焊丝越粗, k_i 值越低, 最小电流值越高, 其调节灵敏度就越低, 电弧受干扰后恢复稳定的时间就越长, 所以等速送丝电弧自身调节系统适宜 $\phi 4\text{mm}$ 以下细丝的焊接。

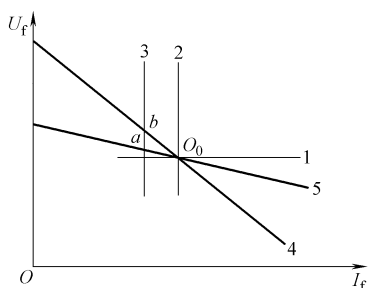


图 1-4-7 焊炬高度波动时的自身调节作用

1—电弧静特性 2、3—等熔化曲线
4、5—电源外特性

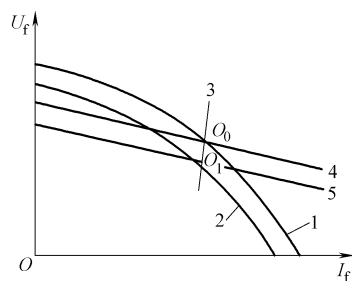


图 1-4-8 网路电压波动时的自身调节作用

1、2—电源陡降特性 3—等熔化曲线
4、5—电源缓降特性

2) 弧焊电源外特性的形状：如图 1-4-9 所示，埋弧焊电弧静特性工作区段呈平特性，选配缓降特性比陡降特性能获得更大的 ΔI_f 和自身调节灵敏度。弧焊电源外特性越缓，其 ΔI_f 越大，弧长恢复速度就越快，而趋于平硬特性的弧焊电源调节灵敏度就更高。但其电流调节精度低，在弧长波动量相同时，电弧自身调节过程中将会产生较大的焊接电流波动，使焊缝熔深变化较大，焊接质量很难控制，因此在等速送丝电弧自身调节系统中，除了 $\phi 2\text{mm}$ 以下细焊丝的薄板高速埋弧焊采用直流平硬特性电源外，一般 $\phi 4\text{mm}$ 以下细丝埋弧焊均采用交流或直流缓降特性弧焊电源。

3) 弧柱电场强度：弧柱电场强度越大，弧长变化时电弧电压和电流变化量就越大，自身调节灵敏度就越高；但是电弧电场强度大，电弧稳定性低，往往要求电源空载电压较高。

4) 电弧长度：当采用短弧焊时，电弧固有的自身调节 k_u 作用明显增大，这样即使采用垂降特性弧焊电源，电弧自身调节作用仍然十分灵敏。它的缺点是，对于所需的电流值的送丝速度可调范围很窄，如果能保证送丝速度与弧焊电源外特性的恰当配合，其焊接电流和弧长均十分稳定，焊缝的熔深、熔宽都很均匀。

(3) 等速送丝自身调节系统参数调节方法 埋弧焊采用缓降特性（或平特性）弧焊电源配用等速送丝系统焊接时，其电弧自身调节系统静特性曲线，即等熔化特性曲线几乎垂直于电流坐标轴，焊接电流的调整将通过改变送丝速度来实现，而改变弧焊电源外特性是调节电弧电压。焊接电流的调节范围将取决于送丝速度的调节范围，而电弧电压的调节范围则由弧焊电源外特性的调节范围确定，如图 1-4-10 所示。

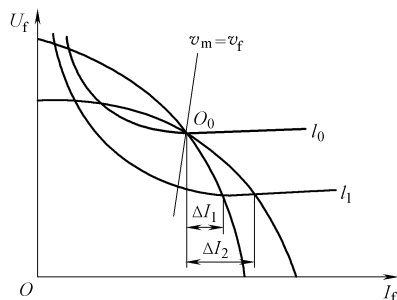
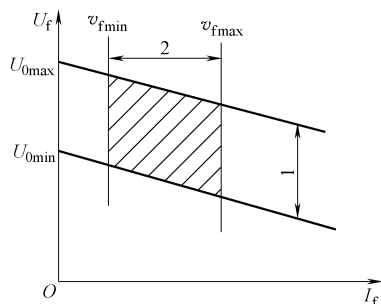


图 1-4-9 外特性形状对自身调节灵敏度影响示意图

图 1-4-10 等速送丝自身调节系统 $I_f U_f$ 调节原理图

1—弧焊电源外特性曲线 (U_f 调节范围)
2—等熔化曲线 (I_f 调节范围)

2. 电弧电压自动调节系统及其工作原理

电弧电压反馈变速送丝调节又称电弧电压自动调节，它和电弧自身调节作用的不同之处在于：

当系统受到外界干扰,弧长波动引起焊接参数偏离原来的稳定值时,利用电弧电压作为反馈量,并通过专门的自动调节器,强迫改变送丝速度来恢复弧长,以保证焊接参数稳定,如图1-4-11所示。从自动控制原理来看,它是以电弧电压为被调量,送丝速度为操作量的闭环系统。可以用试验的方法来测定电弧电压反馈变速送丝调节系统的静特性曲线 C (见图1-4-12a)。电弧在 C 线上的任一点燃烧时,焊丝的熔化速度(v_m)恒等于焊丝的送进速度(v_f),焊接过程稳定。电弧在 C 线下方燃烧时,焊丝的 $v_m > v_f$;电弧在 C 线上方燃烧时,焊丝的 $v_m < v_f$ 。电弧电压反馈变速送丝系统的调节过程如图1-4-12b所示,当电弧在 O_0 点稳定工作时,焊丝的 $v_m = v_f$,弧长稳定。 O_0 点应为弧焊电源外特性曲线、电弧电压反馈系统静特性曲线 C 及弧长为 l_0 时电弧静特性曲线的交点。当弧长受干扰而由 l_0 突然变短为 l_1 时,电弧工作点由 O_0 暂时移到 O_1 点,这时一方面由于 U_f 降低,使送丝速度 v_f 减缓;另一方面则由于 I_f 暂时增加,使焊丝熔化速度 v_m 加快,两者均使工作点向 O_0 点移动,弧长得以恢复。在整个调节过程中,除存在电弧电压反馈调节外,还存在着电弧自身调节作用,所以弧压反馈变速送丝调节作用,比电弧自身调节作用大得多。

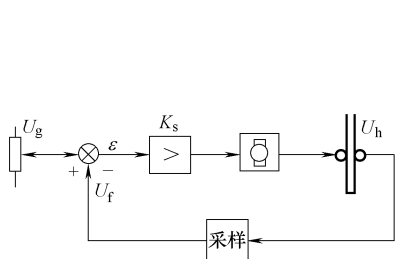


图 1-4-11 电弧电压反馈
调节闭环系统结构框图

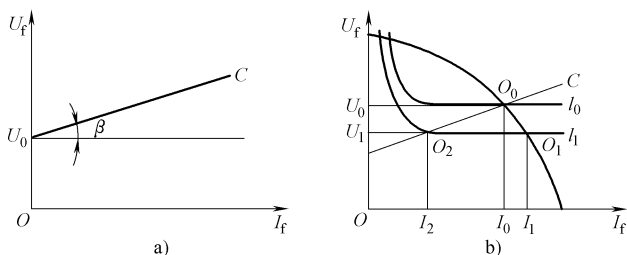


图 1-4-12 电弧电压反馈变速送丝系统调节原理图
a) 系统静特性曲线 b) 弧长波动时的调节过程

(1) 电弧电压反馈变速送丝系统调节精度 其精度受如下因素影响：

1) 弧长波动影响：若弧长波动是在焊丝伸出长度不变的条件下发生的，则上述调节过程最终会使电弧恢复到原来的稳定工作点 O_0 。调节过程不带有静态误差。如果弧长波动是因焊炬高度发生变化，即焊丝伸出长度、反馈调节系统静特性斜率改变的情况下，则新的稳定工作点 O'_0 将带有静态误差。

如图1-4-13所示，静态误差大小取决于焊丝伸出长度的变化量及焊丝直径、电阻率、电流密度。焊丝越细、电阻率越大、电流密度越高，其静态误差越大。通常变速送丝系统用于 $\phi 4\text{mm}$ 以上粗焊丝低电流密度条件下焊接。

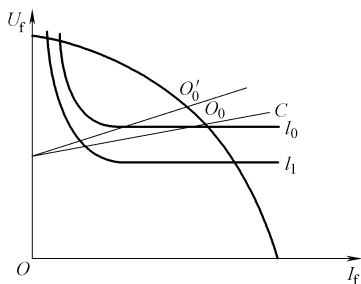


图 1-4-13 焊炬高度波动时系统误差

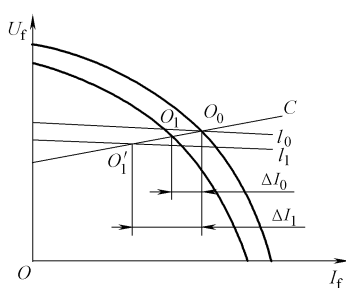


图 1-4-14 电网波动时的系统误差

2) 电网电压波动影响：如图1-4-14所示，电网电压波动时，弧焊电源外特性的移动将使电弧稳定工作点从 O_0 点移至 O_1 点，这时电弧电压误差不大，但电流误差则可能很大，其值大小除取决

于网压波动值大小外,还与反馈调节系统静特性和弧焊电源外特性斜率有关。电压反馈系统调节器 k 值越大,弧焊电源外特性越平硬,电流误差就越大,即 $\Delta I_1 > \Delta I_0$ 。因此,这种系统宜采用陡降特性弧焊电源。

(2) 电弧电压反馈变速送丝调节系统的调节灵敏度 在电弧电压反馈变速送丝系统中:

$$v_f = k(U_f - U_g) \quad (1-4-12)$$

$$v_f = k\Delta U_f \quad (1-4-13)$$

式中 v_f ——焊丝送进速度,单位为 cm/s ;

k ——弧压反馈系统调节器的放大系数,即 U_f 每改变 1V 时 v_f 的改变值,单位为 $\text{cm}/(\text{s} \cdot \text{V})$;

U_f ——电弧电压(反馈电压)被调量,单位为 V ;

U_g ——送丝驱动控制给定电压,单位为 V 。

该系统的调节灵敏度,即弧长恢复速度,主要取决于弧长变动时送丝速度变化量的大小,其电弧电压反馈调节灵敏度与下列因素有关:

1) 电弧电压调节器 k 值越大,调节灵敏度越高,但对于闭环控制系统来说,由于惯性环节的存在, k 值过大容易诱发振荡,因此 k 值不能无限制地增大,而焊丝越细对调节灵敏度要求越高,所以一般 $\phi 3\text{mm}$ 以下细丝不适合使用弧压反馈调节系统。有些焊机为了减小系统机械惯性而采用印刷电动机驱动送丝。

2) 弧柱电场强度越大,同样弧长波动引起的 ΔU_f 增大,调节灵敏度也就增大。

3) 在弧压反馈调节系统中,由于 Δu_f 与 ΔI_f 无关,所以电弧电压反馈变速送丝系统也可以采用垂降特性(恒流)弧焊电源。但采用垂降特性电源,弧长变化时 $\Delta I_a = 0$,所以不存在电弧自身调节作用,其调节灵敏度降低,同时一般埋弧焊电源多为 1000A 以上大容量,相同输出的垂降特性弧焊电源造价较高,因此除采用数字化控制的高精度直流埋弧焊电源以外,一般电弧电压反馈变速送丝系统多配用交流和直流陡降特性弧焊电源。由于弧压反馈和电弧自身调节同时起作用,可充分保证系统调节灵敏度。因而广泛用于 $\phi 4\text{mm}$ 以上埋弧焊生产中。

(3) 电弧电压反馈变速送丝系统参数调节方法 在电弧电压反馈变速送丝埋弧焊系统中,由于系统调节静特性曲线是近于平行电流坐标轴的直线,而弧焊电源通常为陡降特性,如图1-4-15a所示。调节弧焊电源外特性主要是为调节焊接电流,而调节送丝电动机给定电压,即调节送丝速度是为了调节电弧电压。通过弧焊电源外特性调节范围确定了焊接电流范围,而送丝速度调节范围则确定了电弧电压的调节范围。

值得注意的是,焊丝直径的变化直接影响 k_f 值的改变,引起电弧

电压反馈调节变速送丝系统静特性斜率的改变,使系统的电流和电压调节范围产生漂移,造成细丝焊接时电流和电压调节范围向电流减小而电压偏高的方向移动,如图1-4-15b所示,这与一般电流减小时电弧电压也相应减小的参数调节要求是不相适应的。因此这也是变速送丝方式不宜用于焊丝直径 $\phi 2\text{mm}$ 以下的细焊丝埋弧焊的原因之一。

等速送丝电弧自身的调节系统与电弧电压反馈变速送丝调节系统的比较见表1-4-2。

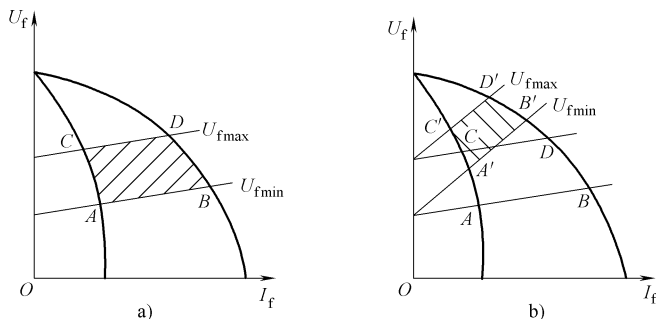


图 1-4-15 电弧电压反馈变速送丝系统参数调节方法

a) 焊丝直径 5mm b) 焊丝直径 2mm

表 1-4-2 两种调节系统的比较

比 较 内 容	调节方法	
	电弧自身调节系统	弧压反馈调节系统
控制电路及机构	简单	复杂
送丝方式	等速送丝	变速送丝
弧焊电源外特性	平或缓降特性	陡降或垂降特性
电流调节方法	调节送丝速度	调节弧焊电源外特性
电压调节方法	调节弧焊电源外特性	调整系统给定电压
使用焊丝直径/mm	1.6 ~ 3	4 ~ 6

4.2.4 机械与控制驱动系统及其工作原理

埋弧焊机的机械系统有小车式、门架式和悬臂式 3 种形式。

小车式是通用埋弧焊机最常见的结构（见图 1-4-2），小车可直接安放在焊件上或移动式轻便导轨上，能焊接不同结构的对接缝、角接缝和圆形容器的内、外纵缝、环缝。

门架式的特征是采用大跨度门架作行走机构，以取代小车，通常安装在固定导轨上。适合于大批量生产的大型平板拼接和单面焊双面成形等专用埋弧焊。

悬臂式为各种容器环缝、纵缝焊接设计的专用埋弧焊机结构形式。常利用操作机的立柱和横臂使焊头在空间移动，与胎具配合实现各种环缝、纵缝及板梁结构的角缝自动焊。

三种系统形式都包括送丝机构、焊车、机头调节机构、导电嘴、焊剂斗、焊丝盘、控制盒等部件。行走机构的实现方式不同，机头调节机构略有差异。下面以小车式为例说明埋弧焊机的机械系统。

1. 送丝机构

送丝机构由送丝电动机、送丝滚轮及矫直滚轮、压紧机构等组成，焊丝靠送丝滚轮夹紧和转动送入导电嘴。拖动方式有直流电动机拖动和交流电动机拖动两种。直流电动机拖动是靠改变直流电动机电枢的输入电压来改变送丝速度；交流电动机拖动是靠更换可换齿轮副来改变送丝速度。

送丝滚轮有 3 种结构。轮毂带齿的双主动滚轮用于 $\phi 3\text{mm}$ 以上粗焊丝， $\phi 2\text{mm}$ 以下细焊丝则采用表面不銹齿但开有 V 形槽的单主动滚轮驱动方式。

2. 焊车

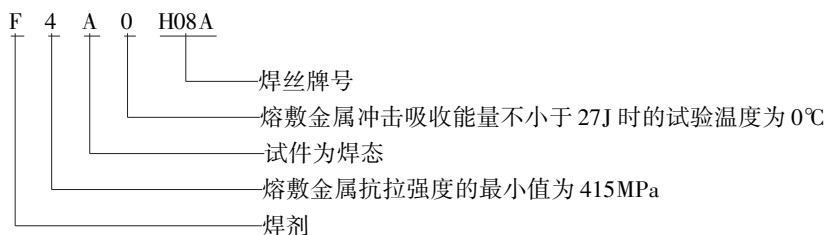
采用焊车作为行走机构，由电动机、减速器传动机构、离合器、行走轮、车架和控制盒等组成。行走轮一般采用橡胶绝缘轮，目的是避免焊接电流流经车轮而短路。当离合器合上时，焊车由电动机拖动行走，当离合器脱离时焊车可用手推动。

3. 机头调节机构

机头调节机构的作用是使焊机能适应各种不同焊件形状或接头形式的焊接。为保证焊丝对准焊缝，送丝机头应有足够的调节自由度。水平和垂直方向的移动通过螺纹传动副手动调节，可在焊接过程中连续调节。角度调节或机头回转采用转动带锁紧的转轴形式，调节好后即锁紧固定，焊接过程中不宜进行调节。

4. 导电嘴

埋弧焊常用的导电嘴有 3 种类型，分别为滚轮式、夹瓦式和偏心式。其中滚轮式和夹瓦式导电嘴均用螺钉压紧弹簧，使导电嘴与焊丝之间有良好的接触，适用于 $\phi 3\text{mm}$ 以上粗焊丝的焊接。夹瓦式导电嘴送丝稳定、磨损容量大，使用效果最好。偏心式导电嘴常称为管式导电嘴，导电嘴和导电杆偏心安装，利用焊丝进入导电嘴前的弯曲而产生必要的接触压力来确保导电接触，适用于 $\phi 2\text{mm}$



焊丝—焊剂组合的型号编制方法规定如下：

- ① 字母“F”表示焊剂。
- ② 第一位数字表示焊丝—焊剂组合的熔敷金属抗拉强度的最小值。
- ③ 第二位字母表示试件的热处理状态，“A”表示焊态，“P”表示焊后热处理状态。
- ④ 第三位数字表示熔敷金属冲击吸收能量不小于 27J 时的最低试验温度。
- ⑤ “—”后面表示焊丝的牌号，焊丝的牌号见 GB/T 5293—1999、GB/T 14957—1994 和 GB/T 3429—2002。

其中“H”表示焊丝，字母后面的两位数字表示焊丝中平均含碳量，如有其他化学成分，在字母后面用元素符号表示，牌号最后的 A、E、C 分别表示 S、P 杂质含量的等级。

常用埋弧焊焊丝直径有 $\phi 2.5\text{mm}$ 、 $\phi 3.2\text{mm}$ 、 $\phi 4\text{mm}$ 、 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 6\text{mm}$ 。

4.3.2 焊剂

1. 埋弧焊焊剂的作用

(1) 保护作用 焊剂在埋弧焊中的主要作用就是造渣，焊剂熔化后形成的熔渣隔绝空气，保护熔池免受氧、氮侵入，防止气孔、裂纹等缺陷的产生。

(2) 渗合金作用 焊接过程中，焊剂和液态金属进行冶金反应，向熔池过渡有益的合金元素，从而改善焊缝性能。

(3) 成形作用 焊剂熔融生成的熔渣覆盖在熔池表面，以保证焊缝获得良好的成形；熔渣凝固形成的渣壳具有良好的脱渣性能。

(4) 稳弧作用 焊剂中有部分电离物质可起到稳定电弧燃烧的作用。

2. 焊剂的分类

焊剂的分类方法有许多种，可分别按用途、制造方法、化学成分、焊接冶金性能等进行分类，也可以按焊剂的酸碱性、焊剂的颗粒结构来分类，如图 1-4-17 所示。

(1) 按制造方法分类 将焊剂分成熔炼焊剂、粘结焊剂和烧结焊剂 3 种。

1) 熔炼焊剂：将各种原料按配方比例干混合，然后在电炉或火焰炉中加热到 1500 ~ 1700℃ 熔炼后，经水中冷却、粒化、烘干、筛选得到的焊剂称为熔炼焊剂。

熔炼焊剂由于经过高温熔炼后粒化而成，具有良好的化学均匀性，筛除细粉粒可以不影响焊剂的成分；玻璃状颗粒熔炼焊剂不易吸潮，简化了储存的问题；玻璃状焊剂的结构紧密，其松装比为 1.1 ~ 1.8g/cm³，颗粒强度较高，使用后回收的未熔化部分焊剂颗粒尺寸及焊剂成分不会发生显著改变，可以多次重复使用。

熔炼焊剂的最主要缺点是在制造过程中经过高温熔炼，不能在焊剂中加入脱氧剂及铁合金。

2) 粘结焊剂：又称陶质焊剂或低温烧结焊剂。将按比例混合的各种粉料用水玻璃搅拌粘结后的湿料制成颗粒状，再经 350 ~ 500℃ 低温烘焙即得到粘结焊剂。

粘结焊剂由于在粘结过程中处于较低的温度，焊剂中可以加入金属脱氧剂及铁合金；焊剂的密度较低，因此，允许在焊缝区使用较厚的焊剂层；凝固的熔渣在焊后易清除。

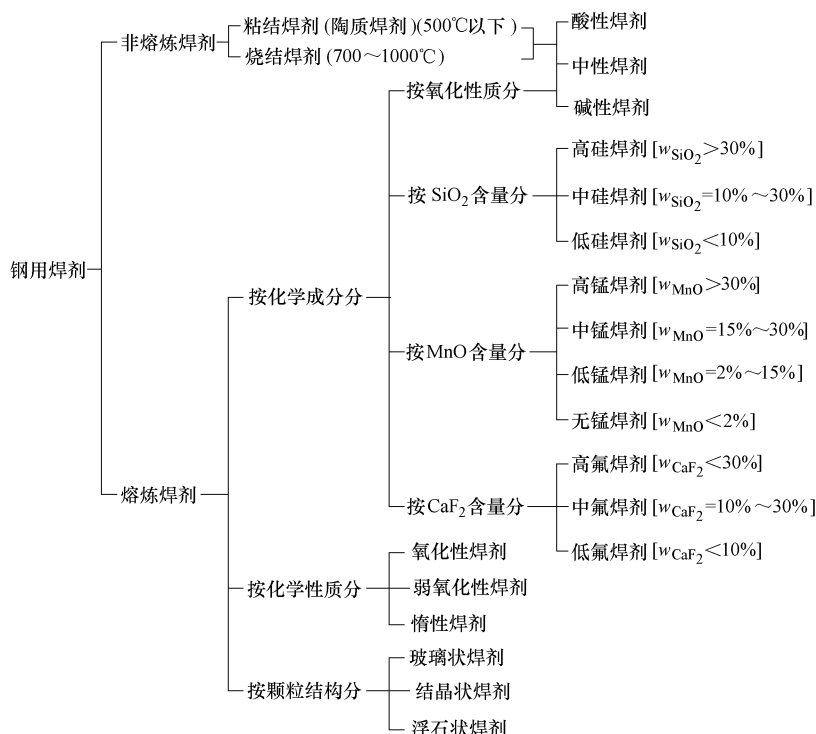


图 1-4-17 焊剂分类示意图

粘结焊剂的缺点是强度较差，易吸潮和粉化，不利于循环使用。

3) 烧结焊剂：烧结焊剂的制造过程与粘结焊剂相似，只是采用陶质粘结剂代替水玻璃；经 700 ~ 1000℃ 高温烧结后粉碎成一定颗粒度使用。与粘结焊剂相比，烧结焊剂颗粒的强度提高，吸潮性大大降低。

与熔炼焊剂相比，烧结焊剂具有以下优点：

① 烧结焊剂可以根据施焊钢种的需要，在焊剂中添加合金，易于调整焊缝金属的化学成分；使熔池脱氧充分，有利于获得高韧性的焊缝；具有更好的抗锈、抗气孔能力。

② 烧结焊剂的碱度调节范围较大，当焊剂碱度值大于 3 时，仍可具有较好的焊接工艺性能。可以适用于焊接性较差的材料焊接，可以满足焊缝超低氢、高强高韧、高洁度的理化性能要求，广泛地应用于高强钢、不锈钢等高合金钢结构的焊接。

③ 烧结焊剂的堆积密度小，渣壳较薄，脱渣性能好，焊剂消耗量少，焊接生产成本较低。适用于高速焊接或大热输入焊接用焊剂。

④ 烧结焊剂配制科学灵活，焊接工艺适应性强，可用于薄板、角焊缝、超大参数、高速、多丝、窄间隙、深坡口等各种工况条件下的焊接，脱渣性优良，对锈不敏感、焊缝成形好。

但烧结焊剂与熔炼焊剂相比也存在缺点：焊接参数的变化会影响焊剂的熔化量，致使焊缝金属的成分和性能出现波动；烧结焊剂的吸潮性较大，容易增加焊缝的含氢量，对其包装、存放条件及焊前烘干的要求比熔炼焊剂严格。

相对于熔炼焊剂，粘结焊剂和烧结焊剂都属于非熔炼焊剂。

(2) 按焊剂化学组分分类 按化学组分特征分类有如下 3 种。

1) 按 SiO_2 含量（质量分数，下同）分为高硅焊剂（ $\text{SiO}_2 > 30\%$ ）、中硅焊剂（ $\text{SiO}_2 = 10\% \sim 30\%$ ）、低硅焊剂（ $\text{SiO}_2 < 10\%$ ）；无硅焊剂。

2) 按 MnO 含量分为高锰焊剂 ($\text{MnO} > 30\%$)、中锰焊剂 ($\text{MnO} = 15\% \sim 30\%$)、低锰焊剂 ($\text{MnO} = 2\% \sim 15\%$)、无锰焊剂 ($\text{MnO} < 2\%$)。

3) 按 CaF_2 含量分为高氟焊剂 ($\text{CaF}_2 > 30\%$)、中氟焊剂 ($\text{CaF}_2 = 10\% \sim 30\%$)、低氟焊剂 ($\text{CaF}_2 < 10\%$)。

通常焊剂由 MnO 、 SiO_2 、 CaF_2 三种组分的不同含量组合而成,如焊剂“431”为高硅高锰低氟焊剂,焊剂“350”为中硅中锰中氟焊剂,焊剂“250”为中硅低锰中氟焊剂。

(3) 按焊剂的渣系类型分类 在焊接过程中,焊剂由于经历了一系列的冶金反应过程,其组成会发生明显的变化。不仅所形成的熔渣组成不同于原配方组成,而且焊后最终形成的熔渣组成也与刚形成熔渣初期的组成不尽相同。即使是在制作过程中预先将原料熔炼而成的熔炼焊剂,其熔渣最终组分也与焊剂原组分有一些不同。焊接后形成的熔渣是氧化物和氟化物、氯化物、硅酸盐等组成的复杂体系。按焊剂的渣系可分为以下几种:

1) 氟碱型 ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{CaF}_2 > 50\%$, $\text{SiO}_2 \leq 20\%$, $\text{CaF}_2 \geq 15\%$) (均指质量分数,下同)。

2) 硅锰型 ($\text{MnO} + \text{SiO}_2 > 50\%$)。

3) 硅钙型 ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 > 60\%$)。

4) 铝钛型 ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 > 45\%$)。

5) 高铝型 ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} > 45\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 20\%$)。

(4) 按熔渣的碱度分类 熔渣的碱度是焊接冶金过程中的重要特征指标。熔渣的碱度值对熔渣的冶金反应、焊缝金属力学性能和焊接工艺性能有很大影响。不同的熔渣结构理论,计算熔渣酸碱度的方法不同,应用较为广泛的是国际焊接学会 (IIW) 推荐的碱度计算公式:

$$B_{\text{IIW}} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{CaF}_2 + \text{BaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + 0.5(\text{MnO} + \text{FeO})}{\text{SiO}_2 + 0.5(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)} \quad (1-4-14)$$

式中,各组分含量按质量分数计算。

根据该公式计算熔渣碱度可将焊剂分为 3 类:

1) 酸性焊剂 ($B_{\text{IIW}} < 1.0$)。焊接工艺性能良好,焊缝成形美观,但焊缝金属含氧量高,低温冲击韧度较低。

2) 中性焊剂 ($B_{\text{IIW}} = 1.0 \sim 1.5$)。不易使合金元素氧化或不向焊缝添加重要合金元素,熔敷金属的化学成分与焊丝的化学成分相近;焊接工艺性能介于酸性和碱性焊剂之间。

3) 碱性焊剂 ($B_{\text{IIW}} > 1.5$)。采用碱性焊剂得到的熔敷金属含氧量低,焊缝金属的脆性转变温度低,可以获得较高的焊缝冲击韧度,抗裂性好,相对熔炼焊剂而言,随着碱度的提高,焊接工艺性能较差,焊道形状变得窄而高,并容易产生咬边、夹渣等缺陷。当焊缝性能要求以抗脆性断裂作为判据的情况下,应优先选用碱性的烧结焊剂。

部分国产熔炼焊剂的碱度值见表 1-4-3。

表 1-4-3 部分国产熔炼焊剂的碱度值

焊剂牌号	HJ130	HJ131	HJ150	HJ172	HJ230	HJ250	HJ251
碱度值 B_{IIW}	0.78	1.46	1.30	2.68	0.80	1.75	1.68
焊剂牌号	HJ260	HJ330	HJ350	HJ360	HJ430	HJ431	HJ433
碱度值 B_{IIW}	1.11	0.81	1.0	0.94	0.78	0.79	0.67

3. 焊剂的牌号表示和含义

焊剂的牌号表示按熔炼焊剂和烧结焊剂分别表示,其含义也不相同。

(1) 熔炼焊剂根据化学组分分类表示 熔炼焊剂牌号“HJ × × ×”前“HJ”为“焊剂”汉语拼音第一个字母,表示埋弧焊和电渣焊用熔炼焊剂。

焊剂牌号第一位数字表示焊剂中 MnO 的含量；牌号第二位数字表示焊剂中 SiO_2 、 CaF_2 的含量及组合；牌号第三位数字表示同一类型熔炼焊剂的不同牌号，按 0、1、2…9 顺序排列。

当同一牌号熔炼焊剂生产两种颗粒度时，在细颗粒焊剂牌号后加“×”区分。

(2) 烧结型焊剂根据渣系类型分类表示 烧结焊剂牌号“SJ×××”前“SJ”为“烧结”汉语拼音第一个字母，表示埋弧焊和电渣焊用烧结焊剂。

焊剂牌号第一位数字表示焊剂熔渣的渣系类型；牌号第二位、第三位数字表示同一渣系类型的烧结焊剂的不同牌号，按 01、02…09 顺序编排。

4. 焊剂颗粒度和堆积密度及其对埋弧焊质量的影响

焊剂颗粒度一般分为两种，普通颗粒度焊剂的粒度为 40~8 目，细颗粒度焊剂的粒度为 60~10 目。目是泰勒筛标的每英寸网眼孔数，焊剂粒度数字表示最大和最小颗粒的数量：例如普通颗粒度焊剂的粒度为 40~8 目表示 98% 的颗粒能通过每英寸 8 孔的筛，只有不到 5% 的颗粒能通过每英寸 40 孔的筛。

焊接过程中焊剂的堆积密度对焊缝表面成形具有一定的影响。焊剂按颗粒结构状态可分为结晶状、玻璃状、浮石状焊剂 3 种。玻璃状焊剂的颗粒透明，结晶状焊剂的颗粒具有结晶体特征，浮石状焊剂是泡沫颗粒。结晶状和玻璃状焊剂的颗粒内部较致密，其松装比为 $1.1 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ ，而浮石状焊剂颗粒比较疏松，内部有很多细微孔隙，其松装比为 $0.7 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$ 。焊剂的堆积密度、热输入和堆积高度对埋弧焊质量有以下影响。

(1) 堆积密度 采用堆积密度小的焊剂进行焊接时，由于颗粒空隙多，焊剂的透气性较好，弧腔中气压比用堆积密度大的焊剂要小，获得的焊缝比较宽，熔深较浅，焊道与母材过渡平滑，不容易产生压痕。当弧腔气压增高时，对焊接熔池加热强烈，焊剂的分解和蒸发消耗热能较大，造成电弧空腔压力增大，电弧宽度减小，所以，采用堆积密度大的焊剂焊接时，焊缝较窄，熔深大，焊缝凸起，外观不佳。

堆积密度增加容易产生咬边，特别是在高速焊接时，应选择堆积密度较小的焊剂，例如焊接锅炉鳍片管，一般使用 SJ501M 焊剂，焊速可达 70m/h。堆积密度较大的焊剂不宜用于高速焊。

(2) 热输入 在大热输入焊接时，使用细颗粒焊剂比使用粗颗粒焊剂效果好。随着焊接电流的增大，焊剂平均粒度应相应减小。同时，小颗粒的百分比应增大。如果焊接电流相对于给定的粒度选得太高，则电弧可能不稳定，并且引起焊道高低不平、焊道边缘不规整。相反，在小电流时如使用细颗粒度焊剂，气体逸出困难，易产生麻点等缺陷。

另外，焊剂被反复撒布、回收焊剂的情况下，氧化皮、灰尘等不可避免地被混入焊剂，改变焊剂的粒度分布，从而影响焊道外观、焊道形状的变化。故应随时补加新焊剂后方可继续使用。

(3) 焊剂堆积高度 焊剂堆高与对焊接熔池的压力成正比。焊剂堆积越高，处在金属与熔渣界面上的气泡受上部焊剂施加的压力越大，气泡越不容易逸出，相对应的气泡内部压力增加，对液态金属表面的压力增大，遗留在焊缝表面的气泡压痕越深。在不外露电弧的条件下，尽量降低焊剂的堆积厚度，以减少压痕。

4.3.3 焊丝和焊剂的选配

埋弧焊焊剂与焊丝的匹配是获得高质量焊缝的关键，正确选用焊剂和焊丝的匹配依据以下两个方面：

1. 被焊材料的类别及其对焊接接头性能的要求

通常根据被焊材料的类别不同及对焊接接头性能的要求不同来选择合适牌号的焊剂与焊丝组合。

1) 在焊接低碳钢和强度等级较低的低合金钢时，按等强原则选用与母材相匹配的焊接材料。

可选用高锰高硅低氟焊剂（如 HJ431、HJ433、HJ430）与低碳钢焊丝（如 H08A）或含锰的焊丝（如 H08MnA）相配合，或用中锰、低锰或无锰的高硅低氟焊剂（如 HJ330、HJ230）与含锰量较高的焊丝（如 H08MnA、H10Mn2）相配合。

2) 在焊接低合金高强钢时，除要使焊缝与母材等强度外，还要特别注意保证焊缝的塑性、韧性和抗裂性。可选用中锰中硅或低锰中硅型焊剂，配合相应的合金钢焊丝。当焊接强度级别比较高的钢时，为了得到高韧度，一般选用碱度高的烧结焊剂。

3) 在焊接耐热钢、低温钢和耐蚀钢时，除了要使焊缝与母材等强度外，还要保证焊缝具有与母材相同或相近的耐热性、耐低温性或耐蚀性，可选用中硅或低硅型焊剂与相应的合金钢焊丝相配合。

4) 焊接奥氏体或铁素体高合金钢时，主要是保证焊缝与母材有相近的化学成分，使焊缝具有与母材相匹配的特殊性能（如耐蚀性等），同时也要满足力学性能和抗裂性能等方面的要求。一般选用碱度比较高的熔炼焊剂或烧结焊剂，与高合金钢焊丝相配合焊接，而不采用高硅型熔炼焊剂，其原因是防止大量渗硅，以避免焊缝的性能下降。考虑到焊接过程中铬、钼等主要合金元素会被烧损，通常选用合金元素含量比母材高一些的焊丝，或考虑从烧结焊剂中过渡合金元素。

2. 埋弧焊工艺特点及其要求

(1) 稀释率高 在进行不开坡口的对接焊缝单道焊或双面焊，以及开坡口的对接焊缝根部焊道焊接时，由于埋弧焊焊缝熔透深度大，母材熔化量大，焊缝的稀释率可高达 70%，这使得焊缝的成分在很大程度上取决于母材的成分，因此选用合金元素含量低于母材的焊丝焊接并不会降低焊接接头的强度。例如，焊接不开坡口的 Q345（16Mn）钢的对接接头时，选用含锰量低于母材的 H08MnA 焊丝和 HJ431 焊剂，能够获得足够高的接头强度。

(2) 热输入高 埋弧焊是一种高效的焊接方法，为了获得高的熔敷率，通常中厚钢板选用大电流焊接，这导致焊接接头的焊接热输入比较大，焊接接头的冷却速度比较慢，带来的后果是焊接接头组织易粗大，强度和韧度降低。为了提高接头的强度和韧度，在焊接厚板坡口的填充焊道时，应选用合金成分略高于母材的焊丝并配用中性焊剂焊接。

(3) 焊接速度快 埋弧焊的焊接速度一般为 25m/h 左右，高速焊时可达 100m/h。在高速焊时，焊缝良好的成形不仅取决于焊接参数的合理调整，而且取决于焊剂的特性，应选择适宜高速焊的焊剂，例如铝钛型的烧结焊剂 SJ501、SJ502 等。

4.4 埋弧焊工艺

埋弧焊的焊接接头形式主要包括对接接头、T 形接头和搭接头。接头设计原理和坡口加工方法，与其他大多数电弧焊方法相似。埋弧焊焊缝坡口的基本形式和尺寸设计可参阅 GB/T 986—1996。

4.4.1 对接接头埋弧焊工艺

1. 对接接头双面埋弧焊

对接接头双面焊是埋弧焊用得最多的工艺方法。其特点是焊完一面后，翻转焊件再焊另一面，焊接过程全部在平焊位置完成，因此焊接质量比较容易控制，对焊接装配的要求不是太高，对焊接参数的波动敏感性不大。接头形式根据焊件厚度、接头性能要求的不同，可选用 I 形坡口、V 形和 X 形坡口以及 U 形和双 U 形坡口等。

I 形坡口对接接头双面埋弧焊焊接技术关键是既要焊接第一面时保证有一定熔深、又要防止熔化金属流溢和烧穿，常采用悬空法、加焊剂垫或临时工艺垫板等工艺措施。

(1) 悬空法 焊件背面不用任何衬垫或其他辅助装置。为防止液态金属从间隙中流失或引起烧穿, 装配时不留间隙或只允许一般不超过 1mm 的间隙。

(2) 焊剂垫法 根据焊件厚度在装配时预留一定间隙, 接头背面衬以焊剂垫, 要求焊剂在接头全长都要与焊件贴合, 并且压力均匀。焊剂垫法用于焊接 I 形坡口预留间隙的接头最为经济。第一面的焊接参数应保证熔深达到工件厚度的 60% ~ 70%。焊完第一面后翻转工件, 进行反面焊接, 其参数可以与正面的相同以保证工件完全焊透。在预留间隙的 I 形坡口内, 焊前均匀填塞焊剂, 可减少产生夹渣的可能, 并可改善焊缝成形。第一面焊道焊接后, 焊接背面焊缝前是否需要清根, 视第一面焊缝的质量而定。

对于厚度较大或不宜大热输入焊接的焊件, 也可采用有坡口形式的焊剂垫施工方法。

(3) 临时工艺衬垫法 焊件装配时留有一定间隙, 保证焊剂填充其中, 接头背面用临时工艺衬垫托住焊剂。工艺衬垫可用薄钢带、石棉板或石棉绳。第一面焊完后, 去除临时衬垫并清理间隙中的焊剂和渣壳, 采用同样焊接参数焊接完成第二面。要求每面熔深略超出板厚的一半。

(4) 开坡口双面埋弧焊 对于厚度较大的焊件, 可采用开坡口进行焊接。接头开坡口的目的主要是为了使焊丝很好地接近接头根部, 保证熔透。此外, 还可改善焊缝成形、调整母材的熔合比和焊缝金属结晶形态等。若焊件厚度不大或只能作单面焊, 则开 V 形或 U 形坡口; 若可作两面施焊, 可开双 V (或 X 形)、双 U 形坡口或 UV 组合型坡口。在同样厚度下 V 形坡口较 U 形坡口消耗较多的填充金属, 板越厚, 消耗越多。但 U 形坡口加工费用较高。

一般情况下, 板厚为 12 ~ 30mm 时, 开单面 V 形坡口, 30 ~ 50mm 可开双面 V 形 (即 X 形) 坡口, 20 ~ 50mm 时可开 U 形坡口, 50mm 以上可开双面 U 形坡口。钝边主要是用来避免烧穿的倾向。

开坡口接头在装配时一般都留适当间隙, 主要是为了保证根部熔透和改善焊缝外形。确定装配间隙时, 要考虑坡口形状和尺寸以及背面有无衬垫等情况。如果所开坡口的角度较小, 则须加大装配间隙。但是, 过大的间隙易烧穿, 还需较多的焊缝填充金属, 增加焊接成本和焊件的变形。通常装配间隙不应大于焊丝直径。如果间隙过小, 则在焊缝根部易发生未焊透或夹渣; 双面焊时就会增加背面清根的工作量。

对多道焊在施焊第一焊道时, 如果背面有焊接衬垫, 其间隙可以加大, 坡口角度可相应减小。

2. 对接接头单面埋弧焊

对接接头单面埋弧焊工艺方法不需要翻转焊件和进行反面封底焊, 可以提高生产率, 减轻劳动强度。根据焊件厚度可以开坡口也可以不开坡口。为了将焊件一次熔透和保证背面成形, 背面需要承托熔融的焊缝金属。常用方法有焊剂铜衬垫、永久性垫板或锁底接头、打底焊缝等。当焊接热输入过大时, 焊接接头的冲击韧性不易保证, 适用于中、薄板焊接。

(1) 焊剂铜衬垫 该法采用带成形槽的铜衬垫, 槽中铺撒焊剂, 焊接时, 这部分焊剂起焊剂垫的作用, 同时又保护铜垫板免受电弧直接作用。成形槽使焊缝背面强制成形。焊件通常不开坡口或开 5° ~ 7° 坡口, 需要留一定的装配间隙, 间隙中心线一定要对准成形槽的中心线, 焊缝两端还要焊引弧板和引出板。这种方法对焊接参数和装配间隙的要求不是十分严格, 且具有焊缝背面成形及尺寸稳定等优点。板料可在电磁平台上固定, 也可用龙门式压力架固定。通过琴键式夹紧装置将接缝两侧夹紧, 同时背面铜垫板借助充气软管的压力贴紧板缝背面以强制焊缝背面成形。高速埋弧焊和多丝埋弧焊对接焊时多采用焊剂铜衬垫 (详见本章 4.7 节)。

(2) 永久性衬垫或锁底接头 厚 10mm 以下的工件可采用永久性垫板单面焊方法。垫板必须紧贴在待焊板边缘上, 垫板与工件板面间的间隙不得超过 0.5 ~ 1mm。垫板在这种方法中, 板缝留适当间隙, 使焊缝熔透到垫板上并与其熔合, 垫板临时地或永久地成为焊件的组成部分, 要求垫板金属应与被焊金属成分相似。采用永久性焊接衬垫单面焊时, 建议不用钝边。

如果设计允许, 接头可以设置得使结构的一部分成为垫板。重要的是接触表面应保持清洁并且

贴紧，否则熔融焊缝金属可能出现气孔和渗漏。如厚度大于 10mm 的小直径厚壁圆筒形工件的环缝对接，可采用锁底接头形式焊接。锁底接头形式图详见 GB/T 985.2—2008《埋弧焊的推荐坡口》。

(3) 打底焊缝 现场施工中，常用焊条电弧焊或药芯焊丝气体保护焊配合陶质衬垫来焊接打底焊道，保证根部焊透并作为后续焊道的支托并保留为接头的一部分。用焊条电弧焊打底焊缝时，推荐用低氢焊条。

3. 对接接头埋弧横焊

横焊位置对接接头埋弧焊主要用于大型储罐的横向环缝现场安装焊接。由储罐内部施工的可能性，可以单面焊或双面焊。除了焊件现场施工特点，需要专门制作的行走机架外，还必须考虑埋弧焊的电弧特性，解决焊缝金属成形和焊剂颗粒撒布的难题。埋弧横焊的实质是将对接横焊接头的焊缝形式转化为角焊缝形式来实施，因此坡口设计为单 V 形，通常焊件上部分加工 45°坡口，下部分不开坡口或开较小角度坡口，图 1-4-18 埋弧横焊坡口示意图来自工程实例。同时，在下部分坡口外侧拼接焊剂托带，以保证撒布足够的焊剂维持焊接过程。

近年来国内已有商品化的埋弧横焊成套设备，主要由焊接行走机架和弧焊电源、焊接机头、控制箱、焊剂托带和焊剂回收系统组成。焊接机头、焊剂托带和焊剂回收系统均集成在行走机架上，完成跟踪坡口、撒布焊剂、焊接和焊剂回收全过程。工作时，机架自身的重量使托轮带紧贴在储罐壁板上，焊剂从机架顶部的焊剂桶中沿导管下落到托轮带上，实现对焊接电弧的保护作用。在焊接的同时，吸压式焊剂回收器将剩余的焊剂从熔池的后方回收到焊剂桶中，再次循环利用。

一种典型的埋弧横焊焊接行走机架实例如图 1-4-19 所示，该机架为自行走装置，行走速度为 6 ~ 160m/h；可焊接的钢板高度最大为 3m、厚度最大为 44mm；通常焊接速度约为 45m/h，焊接电流为 400A，电弧电压为 28 ~ 30V。单焊丝熔敷速度约为 5kg/h。

由于储罐空间尺寸较大，且焊件表面条件不完全理想，坡口跟踪偏差和机架行走平稳性带来的焊接过程参数波动是影响焊缝质量的关键。如由于坡口的不平整导致焊丝顶端远离焊缝时，若不能及时调整，将导致大面积的焊接缺陷出现。近年来数字化技术的应用，横焊设备可以实现电脑远程控制、监视焊接参数，在焊接过程中出现不正常现象时，通过数字反馈及时调整焊接参数，提高了可靠性。

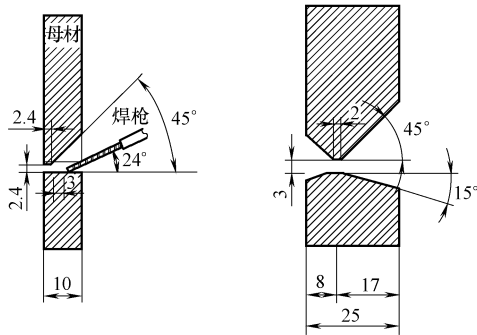


图 1-4-18 埋弧横焊坡口示意图

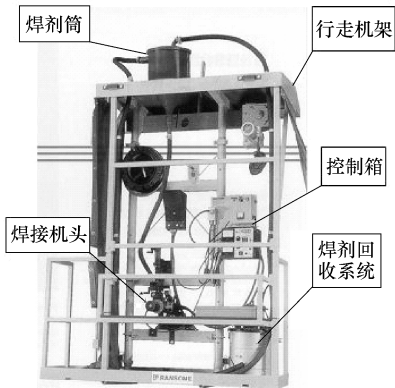


图 1-4-19 埋弧横焊焊接行走机架实例

4.4.2 T 形接头和搭接接头埋弧焊工艺

T 形接头和搭接接头的焊缝均是角焊缝，埋弧焊时，一般采用平角焊和船形焊两种方式。

1. 平角焊法

当焊件不易于翻转或焊件尺寸很大时,采用平角焊来焊接角焊缝,如图 1-4-20 所示。其优点是对装配间隙的敏感性小,即使间隙达到 2~3mm,一般也不致产生金属和熔渣的溢流现象。其缺点是不利于立板侧的焊缝成形。单道焊的焊脚尺寸很难超过 8mm,因为焊脚过大,将引起咬边和满溢。如果需要更大的焊脚尺寸,只能采用多道焊。另外,焊丝与焊件的相对位置对焊缝成形的影响很大,焊丝与立板的夹角 α 一般在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间,否则会造成咬边或成形不好。同时,电弧电压尽量偏小,可以减少熔渣量和防止熔渣溢流。

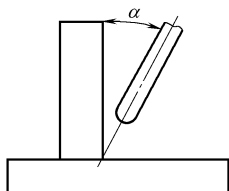


图 1-4-20 平角焊示意图

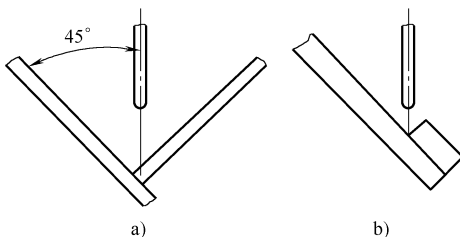


图 1-4-21 船形焊示意图

a) T 形接头 b) 搭接接头

2. 船形焊法

船形焊法主要用于焊件易于翻转的场合。它是将角焊缝的两边置于与垂直线成 45° 的位置,如图 1-4-21 所示。这时接头处在相当于 90° 坡口平焊的位置,焊缝成形最有利,焊接效率高、容易保证焊缝质量,钢结构工字梁的角焊缝埋弧焊采用这一方法是最典型的工艺。船形焊时焊件装配间隙不超过 1.5mm,否则,必须采取措施,以防止焊穿和产生液体金属溢漏。船形焊时单道焊可以增大电流,得到较大且对称的焊脚尺寸和焊趾平顺过渡的表面成形,不会产生咬边和溢流等缺陷。

4.4.3 焊接参数对焊缝质量的影响

1. 熔池形状和焊缝形状

(1) 熔池形状 埋弧焊时,在电弧热作用下熔化的焊丝和母材金属所构成的液体金属熔池较为稳定,其形状和尺寸(见图 1-4-22)与电弧的热输入 $Q(\text{J/cm})$ 的大小有关:

$$Q = \eta I_f U_f / v_w \quad (1-4-15)$$

式中 η ——电弧热效率,埋弧焊时为 0.8~0.9;

I_f 、 U_f 、 v_w ——分别为焊接电流,单位为 A;电弧电压,单位为 V;焊接速度,单位为 m/h。

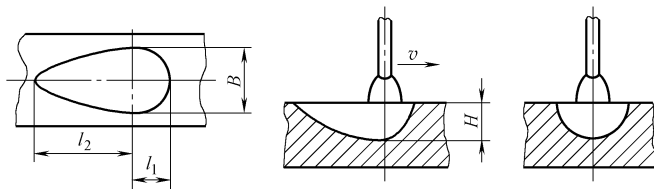


图 1-4-22 埋弧焊熔池形状及尺寸要素

熔池在电弧压力、电磁收缩力、表面张力及液体金属重力等作用下发生剧烈的对流运动。熔池温度是不均匀的。熔池表面张力与温度及液体金属成分有关,因此,熔池中的对流运动状况极为复杂。焊接熔池形状和尺寸目前仍难以用解析法求解,这一熔池动力学问题是当前焊接工艺研究中的重要课题。

(2) 焊缝形状 通常是指焊缝熔化区横截面形状,一般以焊缝计算厚度 H 、焊缝宽度 B 和余高 h 三个参数表征,如图 1-4-23 所示。显然, H 、 B 、 h 都是由熔池尺寸决定的。足够的 H 是焊缝质量好坏的重要指标。 B 、 h 应与 H 有合理的比例。常用焊缝成形系数 $\varphi = B/H$ 、增厚系数 B/h 表征焊缝形状。 φ 值越小,则焊缝深而窄,表明焊接电弧热量集中,焊缝热影响区小。但 φ 值过小,易出现裂纹和气孔。通常,埋弧焊缝最适宜的 φ 值为 $1.3 \sim 2$ 。 B/h 为 $4 \sim 8$,其值过小,对接头动载强度不利,重要结构甚至还应磨去余高。

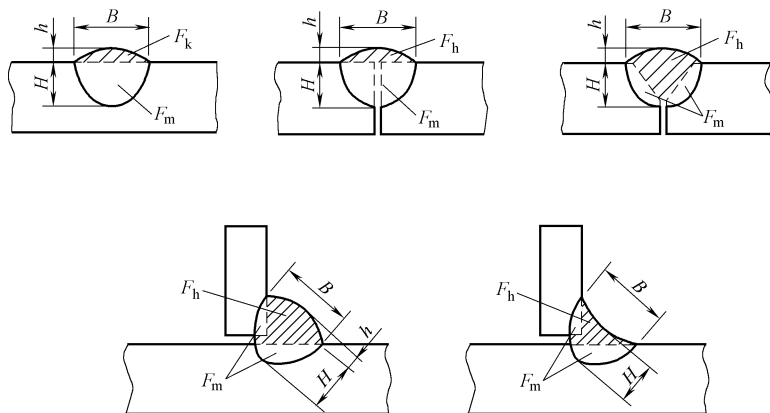


图 1-4-23 焊缝形状及尺寸要素

F_m —母材熔化的横截面积 F_h —填充金属熔敷的横截面积

B —焊缝宽度 H —熔深 h —余高

(3) 焊缝结晶 焊缝金属冷却结晶,总是以熔池尾部边缘母材半熔化晶粒为基础,背着散热方向即垂直熔池壁方向生长的。因此,无论从横向或纵向看,熔池和焊缝形状对焊缝金属的结晶方向、杂质偏析及裂纹敏感性都有直接影响。如图 1-4-24a、b 所示,从横截面看, φ 小的焊缝,从两侧生长的柱状对生结晶会在焊缝中心内部相交,使低熔点杂质聚集于中心,容易诱发裂纹、气孔等缺陷。 φ 增大,则焊缝金属的结晶方向有助于把低熔点杂质推向焊缝上方,因而能抑制裂纹和气孔产生。如图 1-4-24c、d 所示,从纵截面看,熔池尾部越细长,两侧柱晶在焊缝中心夹角越大,焊缝中心偏析严重,强度降低,容易诱发纵向凝固裂纹。熔池尾部呈椭圆时,就不易出现这种裂纹。

(4) 焊缝熔合比 由图 1-4-23 可见,焊缝的熔合比如下:

$$\gamma = F_m / (F_m + F_h) \quad (1-4-16)$$

式中 γ ——熔合比,即母材在焊缝中所占比例;

F_m ——母材熔化的横截面积,单位为 mm^2 ;

F_h ——填充熔敷金属的横截面积,单位为 mm^2 。

γ 的数值可由坡口尺寸及熔池形状调节。在合金钢埋弧焊时,可通过调整 γ 来改变焊缝金属化学成分和组织,是防止焊缝产生冶金缺陷

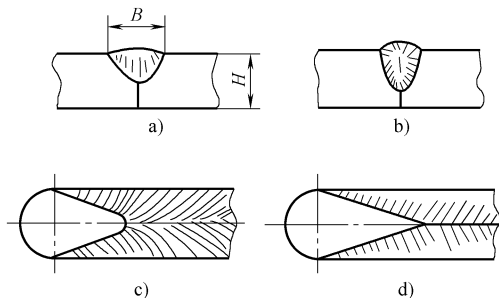


图 1-4-24 熔池和焊缝形状对焊缝结晶方向的影响

陷、提高力学性能的一条有效途径。

2. 焊缝质量的影响因素

影响焊缝质量的埋弧焊焊接参数中，焊接电流及种类、电弧电压、焊接速度起重要作用。生产中通常把这三个参数定为埋弧焊参数，其他影响焊缝尺寸及质量的焊接参数是焊丝直径、焊丝伸出长度、焊剂层的厚度、焊丝与母材之间的倾角和工件斜度等。这些参数影响着焊缝的形状系数和熔合比，从而决定了焊缝的质量。

(1) 焊接电流 焊接电流控制焊丝熔化速度、熔深和母材的熔化量。焊缝金属单位时间的熔敷量几乎直接与电流成正比。埋弧焊焊丝熔化速度与焊接电流的关系如图 1-4-25 所示。

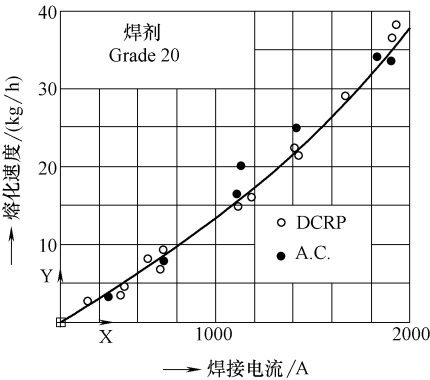


图 1-4-25 焊丝熔化速度与电流关系

焊接电流对焊缝成形的主要影响是焊缝的熔深和余高。图 1-4-26a 为试验得出的基本规律， H 与 I_f 近乎呈线性关系：

$$H = k_m I_f \tag{1-4-17}$$

式中 H ——焊缝熔深；

k_m ——比例系数，取决于电流种类、极性、焊丝直径及焊剂化学成分；

I_f ——焊接电流。

在一定的焊接速度下，如果焊接电流过大，熔透的深度将太深、焊缝余高过大、焊缝成形系数下降，易产生热裂纹，焊接过程中甚至引起烧穿；而且焊缝的热影响区将较大，大电流还会导致焊丝消耗增加，成本增高。反之，焊接电流太小，将导致未焊透或焊缝增高不足，易产生夹渣等缺陷。焊接电流对焊道尺寸的影响规律如图 1-4-26a 所示，对焊缝的熔透及成形的影响如图 1-4-26b 所示。

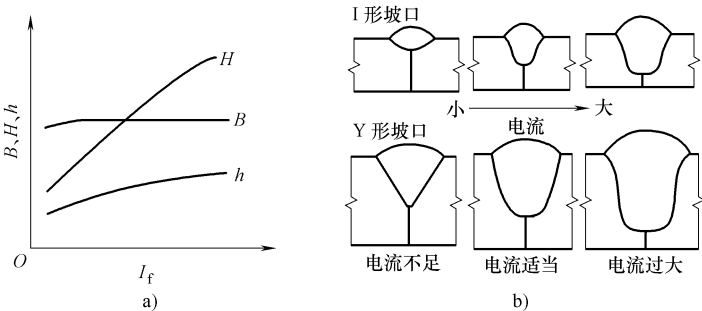


图 1-4-26 焊接电流对焊缝成形的影响

a) 对焊道尺寸的影响规律 b) 对熔透及成形的影响

电流种类和极性影响焊丝的熔化速度。直流正接（DC-SP）时焊丝的熔化速度比直流反接（DCRP）提高 30% ~ 50%，而熔深较浅。因此，直流正接可用于防止含有容易产生热裂纹元素的母材产生裂纹，并可用于堆焊。

直流焊接时可发生电弧磁偏吹现象，焊接电流越大，电弧磁偏吹越明显。磁偏吹的方向受很多因素的影响，例如焊件上焊接电缆的连接位置、电缆接线处接触不良，部分焊接电缆环绕接头造成的二次磁场等。在同一条焊缝的不同部位，磁偏吹的方向也不相同。磁偏吹方向若与焊接方向相反会使熔深增加，熔宽减小。电弧磁偏吹会在焊缝中造成气孔。在接近端部的一段焊缝上，磁偏吹更经常发生，焊缝中气孔也较多。

交流弧焊电源在熔敷速度及熔透上介于直流正接与反接之间，可以减少磁偏吹的影响，适用于有电弧偏吹难以施焊处。正弦波交流的焊接过程稳定性和质量不如直流焊接。矩形波交流焊接过程和质量与直流焊接相当。

(2) 电弧电压 电弧电压和电弧长度成正比，电弧电压对焊丝熔化速度影响不大，主要影响熔化区的形状及焊缝余高。如果焊接电流维持定值，电弧电压相对于电流而偏低，则母材将熔化不足，焊缝宽度变窄，难以获得良好质量的焊缝，熔化的焊丝金属与焊件可能形成连续的短路时，将造成飞溅，熔深 (H) 和余高 (h) 就加大，形状系数下降。当电弧电压逐渐升高到达一个最佳值时，电弧不再爆裂，而是出现一种有规律的尖裂的声音，这时，将获得良好的熔透。如果电弧电压继续升高，电弧的长度将增长。电弧燃烧就不稳定，熔深 (H) 和余高 (h) 会减小，熔宽 (B) 显著增大，通常还会出现咬边。由于电弧过长，有更多的焊剂受到电弧热的作用，因而增加了焊剂的消耗量，甚至电弧从液态的焊剂层下露出，空气侵入熔融的焊缝金属，造成气孔。增加电压对焊道尺寸的影响规律如图 1-4-27a 所示，对焊缝的熔透及成形的影响如图 1-4-27b 所示。

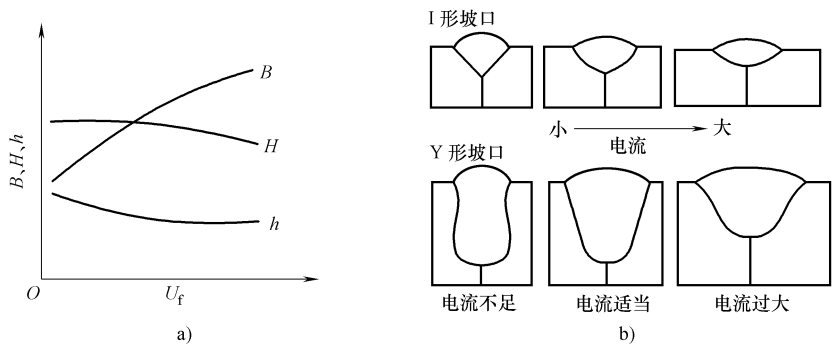


图 1-4-27 电弧电压对焊缝成形的影响
a) 对焊道尺寸的影响规律 b) 对熔透和成形的影响

交流埋弧焊时，为了获得满意的焊缝成形，电弧电压应该依据焊接电流进行调整，即一定的焊接电流要保持一定的弧长才能保证焊接电弧稳定燃烧。

埋弧焊常用焊接电流与电弧电压匹配情况见表 1-4-4。

表 1-4-4 焊接电流与相应的电弧电压

焊接电流/A	600 ~ 700	700 ~ 800	850 ~ 1000	1000 ~ 1200
电弧电压/V	36 ~ 38	38 ~ 40	40 ~ 42	42 ~ 44

(3) 焊接速度 (行走速度) 焊接速度是指单位时间内完成焊缝的长度，行走速度是指焊接机头相对于母材的移动速度。焊接速度影响热输入，是影响焊缝的冶金质量的重要因素。提高焊接速度和降低电流是降低热输入的两种有效措施。提高焊接速度还能减少单位长度角焊缝的焊接时间，但是对已给定电流与焊丝直径焊接单位长度的带坡口焊缝所需焊接时间的影响则很小。

焊道是由电弧所熔化的焊丝及部分熔融的母材所组成。焊接电流一定时，焊丝熔化速度基本不变，焊接速度对焊缝截面的影响来自于电弧的挖掘作用。埋弧焊缝的 15% ~ 60% 可由母材构成，该比例随着焊接速度的提高而降低。焊接速度过高，熔宽 (B) 和熔深 (H) 随焊接速度的增加而减小；降低了熔融金属的润湿作用，并且增加咬边、电弧偏吹、焊缝气孔以及焊道成形不好的可能性。焊接速度过低，熔池满溢，会产生余高 (h) 过大、形成容易引起裂纹的“帽状焊道”；造成过分熔透；并产生一个围绕电弧流动的大的熔池，从而造成焊道粗糙、飞溅及夹渣。焊接速度对焊缝成形的影响规律如图 1-4-28 所示。

(4) 焊丝直径 焊接电流一定时，改变焊丝直径，即改变电流密度，效果与其他条件不变的情况下调整焊接电流相似。减小焊丝直径，电流密度增加，电弧对熔池底部吹力增大，熔深也相应

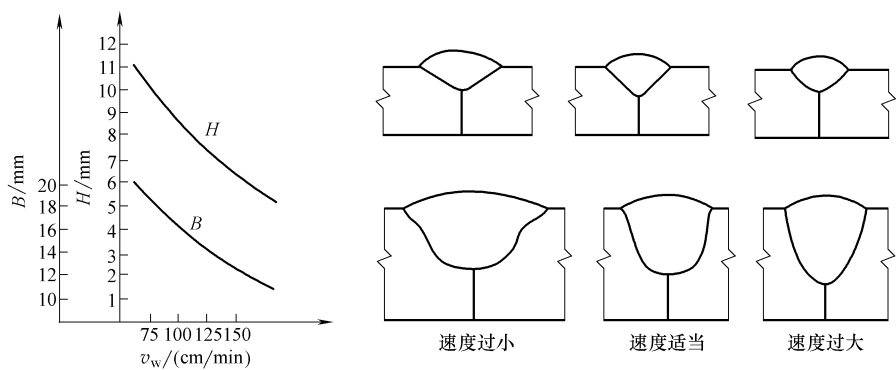


图 1-4-28 焊接速度对焊缝成形的影响

增加，焊缝形状系数减小，表 1-4-5 列出了电流密度对焊缝形状尺寸的影响。

表 1-4-5 电流密度对焊缝形状尺寸的影响（ $U=30\sim32\text{V}$ ， $v_w=33\text{cm/min}$ ）

项目	焊接电流/A							
	700 ~ 750			1000 ~ 1100			1300 ~ 1400	
焊丝直径/mm	6	5	4	6	5	4	6	5
平均电流密度/(A/mm ²)	26	36	58	38	52	84	48	68
熔深 H/mm	7.0	8.5	11.5	10.5	12.0	16.5	17.5	19
熔宽 B/mm	22	21	19	26	24	22	27	24
形状系数 B/H	3.1	2.5	1.7	2.5	2.0	1.3	1.5	1.3

（5）焊丝伸出长度 焊丝伸出长度是指焊接时焊丝端头距导电嘴端部的距离。增加焊丝伸出长度等于增加了焊接电路中的电阻并消耗原先供给电弧的部分能量，导致焊丝熔化速度加快，同时也减小熔深，对焊道成形的影响和降低电压的影响相似。埋弧焊时，焊丝的伸出长度一般为 30 ~ 40mm。也有推荐焊丝伸出长度为焊丝直径的 8 倍。焊接过程中，由于电弧自身调节的作用，焊丝的伸出长度波动不会很大。

用直径 3mm 以下焊丝焊接时，焊丝伸出长度的微小变动将显著影响热效率的分配，对焊缝的形状和熔深有很大影响。当焊接薄板有可能发生烧穿问题时，调大焊丝伸出长度可能会有益。

（6）焊剂层的厚度 颗粒状焊剂层的厚度影响到焊缝的外观和致密性以及焊接操作。如果焊剂层太厚，电弧受约束太大，结果容易形成外观凹凸不平绳索状的焊缝。在焊接过程中产生的气体不容易逸出，并且熔化的焊缝金属表面变得不均匀。如果焊剂层太薄，电弧不能完全埋入焊剂中，就会出现露光和飞溅，焊缝外观也不好，并可能产生气孔。

对于任何一种焊接条件，焊剂层有一最佳厚度。这种最佳厚度可以通过慢慢加大焊剂流量直到埋住电弧并且不再有漏光的方法来确定。气体则围绕焊丝平稳地喷出，且有时会燃烧。焊剂层的厚度一般在 25 ~ 40mm，当使用粘结焊剂或烧结焊剂时，由于密度小，厚度比熔炼焊剂要高出 20% ~ 50%。

焊剂应保持干燥，任何水分都可能引起焊缝产生气孔。

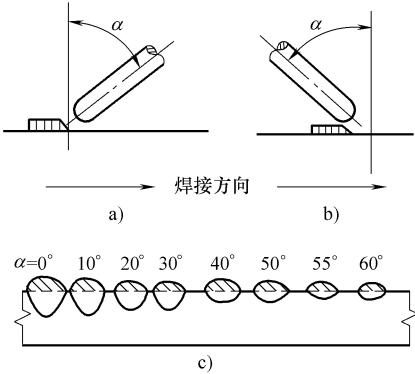


图 1-4-29 焊丝倾角对焊缝成形的影响
a) 前倾 b) 后倾 c) 后倾角

(7) 焊丝倾角和焊件斜度 焊丝相对于焊接方向并垂直于焊缝的倾斜方向分为前倾和后倾两种,如图1-4-29所示。倾斜的方向和倾角大小不同,电弧对熔池的吹力和热的作用就不同,对焊缝成形的影响也不同。图1-4-29a、b分别为焊丝前倾、焊丝后倾。焊丝在一定倾角内后倾时,电弧力后排熔池金属的作用减弱,熔池底部液体金属增厚,故熔深减小。而电弧对熔池前方的母材预热作用加强,故熔宽增大。后倾角对熔深、熔宽的影响如图1-4-29c所示。实际工作中焊丝前倾只在某些特殊情况下使用,例如焊接小直径圆筒形焊件的环缝等。

焊件倾斜后使焊缝轴线不处在水平线上,形成俗称的上坡焊或下坡焊。倾斜的焊接熔池中液态金属受到重力作用,对焊缝成形产生明显的影响。上坡焊如图1-4-30a所示。由于电极下方产生的熔化金属向下流淌而不断被清除,因此总是新的固体金属表面暴露在电弧之下,故熔深变大,余高增加。若倾斜角 $>6^\circ$,则焊缝余高过大,两侧出现咬边,成形明显恶化(见图1-4-30b)。实际工作中应避免采用上坡焊。而在进行下坡焊时(见图1-4-30c),在电极下方形成了熔化金属覆盖层,很难露出新的固体金属表面,所以熔深变小。当倾角过大时,焊缝中间下凹,熔深减小、熔宽增大,可能出现未焊透、未熔合和焊瘤等缺陷,如图1-4-30d所示。

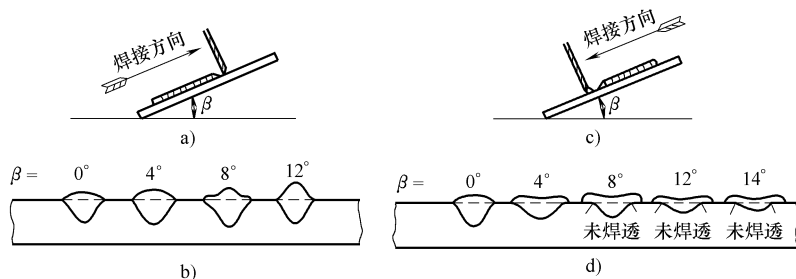


图1-4-30 焊件倾斜对焊缝成形的影响

a) 上坡焊 b) 上坡焊时焊件倾斜的影响 c) 下坡焊 d) 下坡焊时焊件倾斜的影响

在圆筒形焊件的内外环缝埋弧焊接时,通常焊接点视工件直径和电流大小相对于圆筒形外环缝最高位或内环缝最低位偏置一个距离,利用焊件倾斜的特点,以达到控制熔池、改善焊缝成形目的,如图1-4-31所示。其中,内环缝为上坡焊,外环缝为下坡焊。

3. 埋弧焊常用经验公式

焊丝熔化速度 v_m (kg/min):

$$v_m = 4.536 \times 10^{-4} \left[0.35 + \frac{D^2}{654.16} + 2.08 \times 10^{-7} \left(\frac{25.4 I_f L}{D^2} \right)^{1.22} \right] \quad (1-4-18)$$

焊道面积 A ($=A_h + A_m$, mm^2):

$$A = \frac{(25.4)^{2.903} I_f^{1.55}}{10^{3.95} v_w^{0.903}} \quad (1-4-19)$$

焊缝稀释率 γ (%):

$$\gamma = \left[100 - \frac{(25.4)^3 \times 353 \times v_m}{0.4536 F v_w} \right] \times 100\% \quad (1-4-20)$$

电弧的熔透 H (mm):

$$H = 25.4 K \sqrt[3]{\frac{25.4 I_f^4}{v_w U_f^2}} \quad (1-4-21)$$

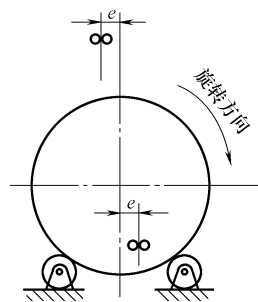


图1-4-31 环缝埋弧焊偏移位置

式中 I_f ——焊接电流, 单位为 A;
 L ——焊丝伸出长度, 单位为 mm;
 D ——焊丝直径, 单位为 mm;
 K ——熔透工艺常数 (对于硅酸盐焊剂为 0.0012);
 U_f ——电弧电压, 单位为 V;
 v_w ——小车行走速度, 单位为 mm/min。

4.5 埋弧焊的其他工艺形式

4.5.1 埋弧堆焊

堆焊是为增大或恢复焊件尺寸, 或使焊件表面获得具有特殊性能的熔敷金属而进行的焊接。对堆焊的基本要求是熔敷率高和稀释率低。能够进行堆焊的方法很多, 如焊条电弧堆焊、氧乙炔堆焊、气体保护电弧堆焊、自保护堆焊、等离子弧堆焊、埋弧堆焊和电渣堆焊等。由于埋弧堆焊熔敷率高, 堆焊层质量稳定, 外表美观, 便于机械化和自动化, 以及无弧光辐射, 因而应用最为广泛。

埋弧堆焊主要应用于碳钢、低合金钢、不锈钢、铸铁、镍及镍基合金表面耐蚀层或耐磨层的大面积堆焊, 是一种异种金属焊接行为。多数情况下, 对于焊接接头不需要考虑的一些特殊因素, 在堆焊时则必须要予以考虑。这些因素包括:

- 1) 堆焊层的化学成分和力学性能通常与母材完全不同。
- 2) 大面积堆焊可能导致大的应力和变形。
- 3) 堆焊层尽可能少但要求熔敷率高而稀释率低。
- 4) 埋弧堆焊虽然可以保证焊接质量 (指无气孔及夹渣), 但由于温度梯度太大, 易引起开裂。

为了避免产生裂纹, 可能要求预热或后热。在某些堆焊金属里, 如高碳高铬铸铁堆焊层里, 在大零件及高拘束度零件的堆焊层里产生细小的表面裂纹是正常的。这是脆性耐磨堆焊合金所固有的特征, 在特定场合是允许的。

1. 埋弧堆焊的工艺特性

埋弧堆焊的工艺特性可以用稀释率、熔敷速度和堆焊层厚度表示。

(1) 稀释率 指堆焊过程中由于母材或预先堆焊金属的熔入而引起熔敷金属有益成分相对减少的程度, 用母材或预先堆焊金属在焊缝金属中所占的百分比 (即熔合比) 来表示, 如图 1-4-32 所示。稀释率是焊接接头与熔敷堆焊层之间的一个最大的不同点, 从冶金的角度看, 稀释率强烈地影响堆焊层的成分和性能。它常常成为关系到堆焊质量的关键。

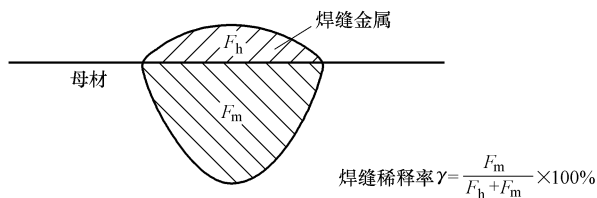


图 1-4-32 焊缝金属的稀释率

注: 图中焊道区 (F_h) 和熔透区 (F_m) 两者本是一个成分均匀的合金, 但绘以不同的阴影线以便说明稀释率的计算。

- (2) 熔敷速度 指单位时间内熔敷在焊件上的金属量 (kg/h), 它标志堆焊过程的生产率。
- (3) 堆焊层厚度 单层可堆焊厚度与堆焊工艺方法、参数或所选用的堆焊材料有关。

2. 埋弧堆焊方法

埋弧堆焊方法有丝极埋弧堆焊和带极埋弧堆焊两种。

- (1) 丝极埋弧堆焊 单丝埋弧堆焊方法适用于堆焊面积小, 或者需要对工件限制热输入的场

合。减小焊缝稀释率的措施有采用下坡焊、增大焊丝伸出长度、增大焊丝直径、焊丝前倾、减小焊道间距以及摆动焊丝等。采用摆动焊丝工艺可堆焊出较宽的焊道，熔敷速度会提高，稀释率减小。

多丝埋弧堆焊方法是把两根或多根焊丝平行送入同一焊接熔池，有摆动或无摆动。可大大提高熔敷速度，同时获得比较低的稀释率和浅的熔深。一般采用横列双丝并联埋弧焊（多弧）和横列双丝串联埋弧焊（单弧）工艺。

丝极埋弧堆焊是埋弧焊方法的一种应用，埋弧堆焊用设备与埋弧焊设备相同。但是，如果要求摆动及添加附加的填充金属时，则需要摆动器及填充金属送进设备。埋弧堆焊可以使用交流弧焊电源，但常用直流正接或直流反接，平特性弧焊电源在任意一种情况下都是最合适的。从提高堆焊质量和生产率考虑，多采用直流弧焊电源反接。

堆焊焊丝有实心焊丝和药芯焊丝两种。随着合金元素和含碳量的增加，实心焊丝的制造工艺更加复杂，成本增高，有的甚至难于实施。药芯焊丝解决了这些方面的难点，使焊丝品种大量增加，应用更趋广泛。但药芯焊丝的合金含量也不能太高。也可以通过烧结焊剂向焊缝中过渡一定量的合金，进一步提高堆焊层的性能。

（2）带极埋弧堆焊 带极埋弧堆焊采用钢带作为电极，它具有熔敷速度快（最高可达丝极堆焊的6倍）；熔深浅，母材的稀释率低（一般堆焊2层即达到设计要求的堆焊层成分）；熔敷率高、焊道边缘整齐，搭接处不易产生未熔合、夹渣、咬边等缺陷；熔敷面积大、焊道宽而表面平滑，成形美观以及焊剂消耗少等优点，因此是当前大面积堆焊中应用最广的堆焊方法。带极埋弧堆焊广泛用于化工、核电等压力容器的内表面耐蚀层堆焊，也用于轧辊、连铸辊和高炉料钟等产品的外表面耐磨层大面积堆焊。

带极埋弧堆焊使用专用机头，包括送带机构、导电块和前后焊剂投料斗。带极埋弧堆焊机头实例如图1-4-33所示。弧焊电源一般使用直流反接。

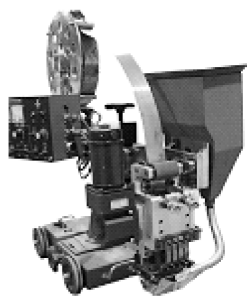


图1-4-33 带极埋弧堆焊机头实例图

带极埋弧堆焊用实心焊带为半冷轧状态，对焊带的表面质量和尺寸公差有较高的要求。通常焊带的厚度为0.4~

0.5mm，宽度为30~90mm。药芯焊带的厚度为1~4mm，宽度为10~45mm。因焊带尺寸、焊剂类型和堆焊方法的不同，堆焊焊接参数会不同。

1) 耐蚀层带极埋弧堆焊：耐蚀层带极埋弧堆焊用焊带包括铬镍不锈钢和镍基合金焊带两大类，主要通过焊带熔化后形成的堆焊层达到耐腐蚀的目的。在需要堆焊两层时，第1层一般选用D03Cr24Ni13（309L）焊带作为过渡层。耐蚀带极埋弧堆焊可选配熔炼型焊剂或烧结型。

2) 耐磨层带极埋弧堆焊：耐磨层带极埋弧堆焊有以下3种合金化方案。

① 采用合金焊带。在焊接过程中，焊带融化将所含合金过渡到堆焊层熔敷金属中，堆焊层成分依靠焊带合金化。应用该工艺优点是焊带的合金直接过渡到熔池中，合金元素损失少；可使用通用型烧结焊剂。

② 在烧结焊剂制作过程中加入所需要的合金成分，配合碳钢钢带，依靠焊剂熔融后合金过渡达到调整堆焊层成分。采用这种方案焊接过程中只有部分合金元素进入熔敷金属，其余部分则残留在焊接熔渣中，合金元素损失较大，耗用焊材成本较高。

③ 合金粉末配合低S、P的碳钢钢带和烧结焊剂。把按堆焊层要求配制的金属粉末撒布在电弧前面的工件表面上，然后再撒上焊剂层。焊接过程中电弧熔化粒状金属及焊丝，形成堆焊金属。这种堆焊方法的填充金属较便宜、熔敷速度高、熔深浅及母材的稀释作用小，但是要求精确控制堆焊过程。为了获得预期化学成分的堆焊金属，电弧功率、焊道尺寸、焊接速度、焊丝送进速度及合金

粉末的撒布量都必须合适且要严格控制。撒布的颗粒状金属粉末重量与熔化焊带之间有固定比例关系，一般为焊带重量的 1.5~3 倍。

4.5.2 窄间隙埋弧焊

窄间隙埋弧焊 (Narrow Gap SAW 或简称 NG SAW) 是一种用于厚板对接接头焊接，焊前焊件不开坡口或只开小角度坡口而留有窄而深的间隙，采用多层埋弧焊进行焊接的高效率焊接方法。窄间隙埋弧焊特别适用于化工设备、电厂设备、核工业设备等厚板结构的焊接。

1. 窄间隙埋弧堆焊特点

当板厚较厚 ($\geq 50\text{mm}$) 时，如果采用常规的埋弧焊方法，为了保证根部和侧壁熔透，需要开 U 形或双 U 形坡口，坡口的加工量很大，焊接层数、道数多，生产效率低下，而且焊接质量难以保证。窄间隙埋弧焊就是为了克服上述弊端而发展起来的，窄间隙埋弧焊具备如下特点：

1) 依靠埋弧焊方法的电弧热源及其作用特性，无需采取特别技术即可解决极小坡口面角度 ($0^\circ \sim 7^\circ$) 条件下的侧壁熔合难题，这是埋弧焊方法在窄间隙焊接技术中应用比例最高的重要原因。

2) 埋弧焊过程中熔滴为渣壁过渡，液渣罩和固态焊剂的高效“阻挡”作用，焊缝几何尺寸对电弧热输入参数波动不敏感，不会产生飞溅，极大地提高了窄间隙埋弧焊时送丝及焊枪在坡口内移动的可靠性，这对保证窄间隙焊接的熔合质量和过程可靠性起了决定作用。

3) 在多层多道方式焊接时，焊道熔敷越薄，后续焊道对先前焊道的累积热处理作用越完全，通过一次、二次甚至三次固态相变，使焊缝和热影响区中的部分粗晶区转变成细晶区。通过单道焊缝成形系数的调节，可以有效地控制母材焊接热影响区和焊缝区中粗晶区和细晶区的比例。通常焊缝成形系数越大，热影响区和焊缝区中的细晶区比例越大。这对提高窄间隙焊焊态接头的组织均匀性和力学性能均匀性具有极其重要的意义。

4) 采用窄间隙埋弧焊，可以不开坡口或只开小坡口，大大减少坡口的加工量和熔敷金属量，而且坡口截面小，可以减少焊缝的热输入，既节省焊接材料又节省能耗，具有效率高、经济性好等明显的优越性。

5) 由于狭窄坡口内单道焊接时极难清渣，使得窄间隙埋弧焊接时，必须采用每层 2~3 道的熔敷方式。这使得窄间隙埋弧焊不可能把填充间隙缩到像 NG-TIG、NG-GMAW 那样小 (10mm 左右)，其最小间隙一般也在 18mm 左右。

2. 窄间隙埋弧堆焊工艺方法及其要求

窄间隙埋弧焊有单丝窄间隙焊和双丝窄间隙焊两种，采用双丝焊时可比单丝焊时熔敷效率提高 1 倍。目前窄间隙焊能焊接的最大板厚可达 350mm。窄间隙焊接头根部部分坡口形式根据背面可否清根封底有所不同，典型窄间隙焊接头形式如图 1-4-34 所示。参考焊接参数见表 1-4-6。

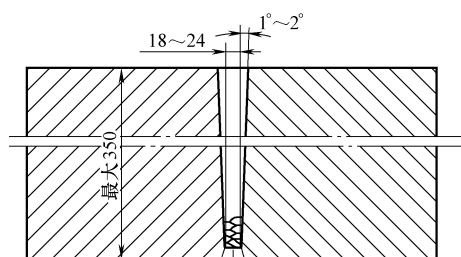


图 1-4-34 典型窄间隙焊接头形式

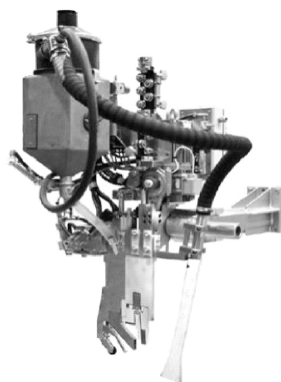


图 1-4-35 窄间隙焊机头

表 1-4-6 窄间隙埋弧焊参考焊接参数

焊丝直径/mm	电流种类	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(m/h)
4	DC	500 ~ 650	29 ~ 30	27 ~ 36

相对于普通埋弧焊，实施窄间隙埋弧焊时，必须配备专用机头和脱渣性能良好的焊剂。

(1) 窄间隙埋弧专用机头 焊结构件要求不太高的情况下，如果只是为了提高厚板焊接的效率，普通的埋弧焊机可应用于窄间隙埋弧焊方法。为使焊丝送达厚板窄坡口底层，导电嘴需要根据坡口深度相应加长，在导电嘴表面必须采取绝缘措施，以防止导电嘴与工件短路而被烧毁；或者专门设计成扁平形导电嘴，能够尽量减少与坡口侧面接触的可能性。为了保证坡口两侧熔合良好，要求机头的跟踪对中机构精确可靠。

在专用机头的设计中，机头应具有随焊道厚度增加而自动提升的功能，导电嘴应具有随焊道的切换而自己偏转的功能。在焊接厚壁环缝时，焊件下面的滚轮架还应装设防止工件轴向窜动的自动防偏移装置。一种商品化的专用窄间隙焊机头如图 1-4-35 所示。专用机头通常安装在机架上，机架的结构形式应该适应被焊工件的结构特点。即使是采购成套设备，也必须考虑机头的可调节范围和配套机架应该与被焊工件的厚度、结构特点匹配，向设备商定制。

(2) 窄间隙焊用焊丝和焊剂的选配 窄间隙焊用焊丝的选用原则与普通埋弧焊相同，但是对配用焊剂的要求较高。窄间隙焊的成功实施取决于焊剂的脱渣性。在窄间隙的坡口焊接时，熔渣的侧面紧密粘附于坡口内表面，使得坡口内表面对渣产生拘束，很难清除。即使在单层单道焊或宽坡口内焊接时脱渣性良好的焊剂，当被用于窄间隙焊接时，其脱渣性通常变差。

同时，焊剂还应具备良好的成形性能，为防止多层焊时坡口壁附近产生缺陷，坡口内焊道应光滑且呈凹形。用于窄间隙焊的焊剂颗粒度一般较细，为满足高强韧性焊缝金属性能，大多为高碱度烧结型焊剂。

4.6 埋弧焊的主要焊接缺陷分析

埋弧焊时可能产生的缺陷有焊缝成形不良、咬边、未熔合、未焊透、夹渣、气孔和裂纹等。本节主要叙述气孔、裂纹的产生原因及其防止措施。

4.6.1 气孔

产生气孔的来源主要是水、油、锈和有机物分解产生的氢，以及来自空气中的氮。焊缝中的气孔可能破坏接头的致密性，严重的气孔会削弱焊缝截面积，降低接头的承载能力。气孔有单个气孔、链状气孔及密集气孔等形态。防止气孔的根本措施是减少气体来源和改善熔池排除气体的条件。产生气孔的原因及其防止措施如下：

(1) 焊剂潮湿或不干净 焊剂中的污物、水分、尘土和氧化铁屑等都会使焊缝产生气孔，在回收使用的焊剂中这个问题更为突出。防止焊剂吸收水分的最好方法是正确地储存和保管。焊剂在使用前，应按焊剂生产厂家提供的说明进行烘焙处理。回收的焊剂发现吸潮后也必须再烘焙才能使用。采用真空式焊剂回收器可以较有效地分离焊剂与尘土，从而减少回收焊剂在使用中产生气孔的可能性。

(2) 焊接时焊剂覆盖不充分 合适的焊剂层厚度可以遮蔽电弧光外泄。如果焊剂层不够厚，电弧闪露出来，就有可能卷入空气而产生气孔。焊接环缝时，特别是小直径的环缝，容易出现这种现象。通常小直径环缝埋弧焊时须用辅助器具，以保持焊剂覆盖电弧。

同样，如果焊缝尚未凝固而熔渣从焊缝上流掉，焊缝会出现表面气孔。角焊缝及多道横焊的角焊缝，由于焊剂流失特别容易产生表面气孔。类似的情况还有电弧电压过高造成电弧外露可能产生

气孔。

(3) 电弧磁偏吹 电弧偏吹产生气孔的情况常见于采用直流、高焊接速度焊接薄板, 气孔常出现于焊缝末端。焊接时经常发生电弧磁偏吹现象, 特别是在用直流电焊接时更为严重。产生电弧偏吹可能有多种原因, 包括接地线的位置不当、接地不良或者焊接电缆部分缠绕于所焊的接头周围产生的二次磁场等。为了减少磁偏吹的影响, 应使接地线的位置尽可能远离焊缝终端; 保持接地线与工件接触良好, 或者采用交流弧焊电源以减弱磁偏吹的影响。

(4) 工件焊接部位被污染 焊接坡口及其附近的铁锈、油污或其他污物进入接头中是产生气孔的最常见的原因, 焊接前必须全部清除, 包括潮气、锈、油、漆及尘土等。对接接头坡口两侧母材的氧化皮或锈也必须加以清理, 如不清除净也会产生气孔。

(5) 焊丝表面生锈或沾污 焊丝表面生锈或被油脂等沾污也可能产生气孔。为送丝而涂的一层非常薄的专用润滑剂, 有助于防止焊缝产生气孔。

4.6.2 裂纹

焊缝中的裂纹是最危险的焊接缺陷, 它会导致结构在承载时失效和断裂。埋弧焊接头有可能产生两种类型裂纹, 即结晶裂纹和冷裂纹。前者只出现于焊缝金属, 后者则可能发生在焊缝金属或热影响区。

1. 结晶裂纹

结晶裂纹是在焊缝凝固后期所形成的焊接裂纹, 又称凝固裂纹。焊缝中的 S、P 等杂质在结晶过程中形成的低熔点共晶, 在焊缝凝固过程中被排挤到晶界形成“液态薄膜”, 同时焊缝凝固收缩产生的拉应力作用下形成裂纹。低熔点共晶是产生结晶裂纹的根本原因, 拉应力是产生结晶裂纹的必要条件。

防止埋弧焊时产生结晶裂纹的措施主要是合理选择焊接材料和控制焊接参数。

(1) 控制焊缝熔比 钢材的化学成分对结晶裂纹的形成有重要影响。主要的影响元素 C、Mn、S 含量与焊缝结晶裂纹倾向的关系如图 1-4-36 所示。可见硫对形成结晶裂纹影响最大, 但其影响程度又与钢中其他元素含量有关。Mn 与 S 结合成 MnS 能除硫, 从而对 S 的有害作用起抑制作用。Mn 还能改善硫化物的性能、形态及其分布等。含 C 量越高, 要求 Mn/S 值也越高。因此, 焊接中碳钢、高碳钢以及异种金属焊接时为了防止硫等杂质熔入焊缝, 有必要限制埋弧焊焊缝的熔比。

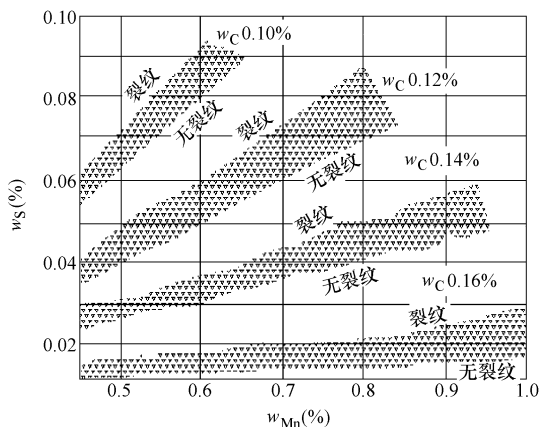


图 1-4-36 Mn、C、S 同存对结晶裂纹的影响

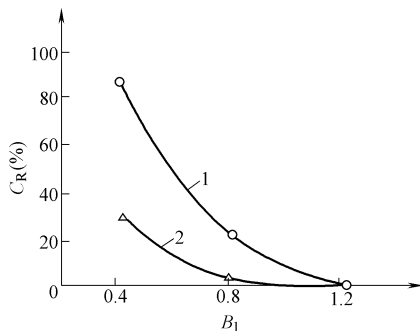


图 1-4-37 熔渣碱度对焊缝热裂纹的影响

1—FISCO 抗裂试验 2—U 形坡口自拘束抗裂试验

通过采用直流正接以减小熔深、用粗焊丝以减小电流密度、改变坡口尺寸或多道焊等工艺措施调整焊缝熔合比可以有效防止结晶裂纹。

(2) 焊接熔渣碱度 焊接熔渣碱度高低的不同,对于焊缝中杂质的数量及其形态都有影响,碱性熔渣具有一定的脱硫作用。Incoloy800 铁镍基合金 (Cr21Ni33) 焊缝热裂纹与熔渣碱度关系的实验结果如图 1-4-37 所示。可见,提高熔渣碱度可以显著降低焊缝的热裂倾向。

特别是在低合金高强度钢或重要钢结构焊接时,为了控制焊缝中有害杂质的含量,采用碱性焊剂,可以降低结晶裂纹的倾向。

(3) 焊缝成形系数 焊缝成形系数 $\varphi = B/H$ 值对焊缝的抗热裂性能影响很大。用改变碳钢焊缝含碳量来变化热裂倾向,如图 1-4-38 所示。 φ 值提高到 7 左右时,焊缝中碳的质量分数达 0.22%,还可不产生凝固裂纹。 $\varphi > 7$ 后,是带状电极堆焊的情况,由于焊缝截面过薄,抗裂性反而下降。 φ 值主要影响到结晶成长方向及其会合面的偏析情况。当 φ 值较小时,窄而深的焊道因结晶相对生长,杂质析集严重,在焊缝中心形成“液态薄膜”,将加大结晶裂纹的形成倾向。一般希望尽可能避免出现 $\varphi < 1$ 的情况,即焊缝实际厚度不要超过焊缝宽度。

调整焊接参数可以控制焊缝成形系数 φ 。在平焊位置时,焊缝成形系数 φ 随焊接电流增大而减小,随电弧电压增大而增大。焊接速度增大从而导致热输入减小时,焊缝整个截面要减小,焊缝成形系数 φ 也会有所减小。

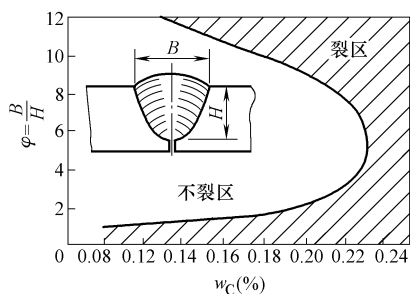


图 1-4-38 焊缝成形系数 φ 的影响低碳钢焊缝, SAW,
 $w_S = 0.020\% \sim 0.035\%$, $Mn/S \geq 18$

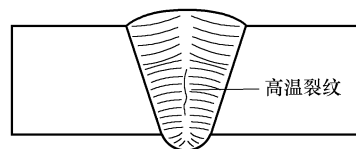


图 1-4-39 典型终端裂纹截面示意图

2. 终端裂纹

在长焊缝单面自动焊时,在接头终端附近的焊缝金属中心部发生的纵向裂纹,如图 1-4-39 所示。终端裂纹是结晶裂纹的一种特例。在接头终端部安装平板的引出板情况下,使用大热输入的焊剂铜衬垫 (Flux Copper Backing, 简称 FCB 法) 单面埋弧焊时,接头终端部的焊接线呈横向变形的测定如图 1-4-40 所示。

由此得知,电弧从接头终端部移动至端部引出板时会发生大幅度变形,如图 1-4-41 所示。可推测变形是在进行焊接的同时,由于焊接热作用使焊接接头部分向长度方向膨胀 (A—A),当电弧通过接头终端时,焊缝金属受到沿 B 方向的拉力作用;进而电弧移至引出板时,引出板自身由于焊接热而向 A'—A' 和 B' 的方向膨胀,即所谓的“回转变形”。焊缝金属处于半熔化状态或凝固后不久的高温状态下,受到与焊接线垂直方向的拉力作用而导致终端裂纹的发生。

终端裂纹虽然最易发生于相对于板厚而言焊接热输入最大的单面埋弧焊的焊缝金属上,但采用两面埋弧焊也有可能发生同类裂纹。终端裂纹一般发生于焊缝金属的中心内部。

进行焊剂铜衬垫法单面埋弧焊时,如果在焊接接头的终端部安装通常用的平板状端部引出板,其终端裂纹发生频率非常高。单面埋弧焊时,相对于板厚的焊接热输入大,由于热应力的作用而使接头终端部的变形明显,所以将端部引出板稍微加大,也不能减轻终端裂纹的发生。

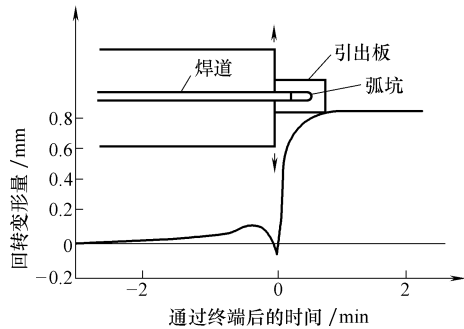


图 1-4-40 接头终端部的焊接变形

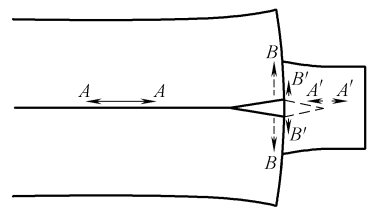


图 1-4-41 接头终端部位变形的发生机制

对焊剂铜衬垫法单面埋弧焊时终端裂纹常用的几种防止方法说明如下：

(1) 终端拘束焊道法 又称阶梯式密封法。一种采用焊条电弧焊或 CO₂ 半自动焊在终端事先焊接阶梯式拘束焊道，不使背面焊缝发生，通过阶梯式焊接阻止工件产生回转变形防止终端裂纹的方法。拘束焊道如图 1-4-42 所示，焊道尺寸见表 1-4-7。进行 FCB 焊接施工时，当焊接至拘束焊道时，切断前丝电弧，只用后丝进行余下的焊接。注意应保证与拘束焊道的充分熔合。

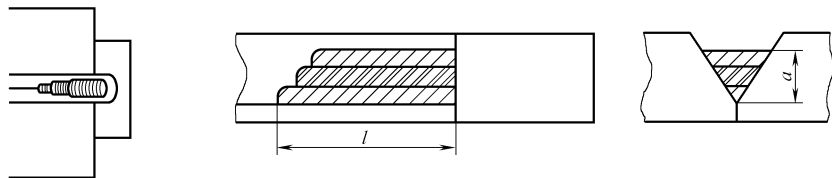


图 1-4-42 终端拘束焊道法

当需要返修时，返修的长度为拘束焊道长度 + 100mm。

表 1-4-7 拘束焊道尺寸

拘束焊道长度 l	$\geq 300\text{mm}$
拘束焊道厚度 a	$\geq l/2$ (t 为板厚)

终端拘束焊道法适用于各种板厚级别，是现行所用各种终端裂纹防止法中终端裂纹防止率最高的一种。

(2) 终端加热法 焊接过程中，焊接机头移至距终端部 5 ~ 7m 时开始对焊件加热，并保持该区域温度直至焊接完毕。终端加热法的加热区域如图 1-4-43 所示。加热区域各参数见表 1-4-8。

通过对接近坡口终端部区域加热，调整该区域焊接过程中温度分布，减弱终端部位回转变形，从而防止终端裂纹发生。这种方法在实际应用中效果较好。

表 1-4-8 加热区域参数表 (单位：mm)

板厚	机头至终端距离 l	加热长度 L	起始加热宽度 B_1	终端加热宽度 B_2
≤ 18	5000	400	60	400
19 ~ 23	6000	450	70	500
≥ 24	7000	500	80	600

(3) 弹性拘束板法 将终端引出板的弧坑引出部分与母材终端部的拘束部分通过切口，隔离热量，以防止焊接到终端部时引出板拘束力下降，如图 1-4-44 所示。该法应用中有双切口也有单切口的不同。

由于引出板切口产生的隔热作用及弹性拘束作用,与普通引出板相比,回转变形的产生相对缓慢,焊缝的最大内变形量也因而显著降低,可以比较有效地防止终端裂纹。

相对来讲,弹性拘束板法对防止较薄板材的终端裂纹效果更明显。

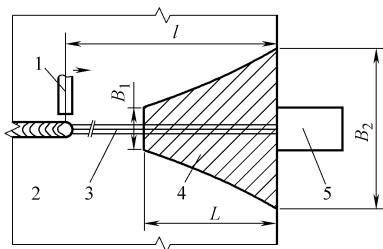


图 1-4-43 终端加热法

1—机头 2—焊件 3—待焊坡口 4—加热区域 5—引出板

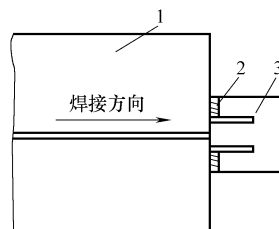


图 1-4-44 弹性拘束板法

1—试板 2—拘束焊缝 3—楔弧板

3. 冷裂纹

焊接接头冷却到较低温度下(对于钢来说,在 M_s 温度以下)时产生的焊接裂纹。埋弧焊时冷裂纹的形成机理与其他焊接工艺方法过程相同,是钢种的淬硬倾向、焊接接头含氢量及其分布、焊接接头的拘束应力三大因素相互作用的结果,主要发生在低合金钢、中合金钢和高碳钢的焊接热影响区。

厚度 10mm 以下工件的埋弧焊时,一般很少发现冷裂纹。工件较厚时,焊接接头冷却速度较大,对淬硬倾向大的母材金属,易在接头处产生硬脆的组织。另一方面,焊接时溶解于焊缝金属中的氢,由于冷却过程中溶解度下降,向热影响区扩散。当热影响区的某些区域氢浓度很高而温度继续下降时,一些氢原子开始结合成氢分子,在金属内部造成很大的局部应力,在接头拘束应力作用下产生裂纹。

焊接某些超高强度钢时,这种裂纹也会出现在焊缝金属中。

对于低碳低合金高强钢,常用冷裂纹敏感性指数 P_{cm} 来判断钢的冷裂纹发生倾向。

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (1-4-22)$$

P_{cm} 值低,则钢的抗裂能力强,焊接性好。早期的低裂纹敏感性高强钢是采用调质工艺生产的,为了保证钢的淬透性,往往需要添加很多合金元素,如 Cr、Mo、Ni 等。随着现代轧制技术的发展,很多钢厂都能成熟应用 TMCP 工艺。TMCP 钢与常规轧制钢和正火钢相比,它不依赖合金元素,通过控轧控冷技术,可达到高强度和高韧性的要求,而且在碳当量较低的情况下能够生产出具有高强度和良好的低温韧性的钢材。低裂纹敏感性钢种已经在造船、海洋工程、石油化工、桥梁、建筑等各行业得到广泛应用。

防止冷裂纹,主要从减少焊接区淬硬组织、降低焊缝中氢的浓度和尽量减小焊件拘束应力着手。

(1) 采用低氢焊剂 减少氢的来源及其在焊缝金属中的溶解;焊剂保管中注意防潮,使用前严格烘干;对焊丝、工件焊接接头附近的锈、油污、水分等焊前必须清理干净。

高 Mn 高 Si 焊剂可以通过焊剂的冶金反应把氢结合成不溶于液态金属的化合物,如把 H 结合成 HF 和 OH 两种稳定化合物进入熔渣中,减少氢对生成裂纹的影响。

(2) 正确选择焊接参数 降低钢材的淬硬程度,利于氢逸出和改善应力状态,必要时可用预热。

(3) 采用后热或焊后热处理 后热有利于焊缝中的溶解氢顺利逸出。有些工件焊后需要进行

热处理，较多采用回火处理。这种热处理的效果一方面可消除焊接残余应力，另一方面使已产生的马氏体高温回火，改善组织。同时接头中的氢可进一步逸出，有利于消除氢致裂纹，改善热影响区的延性。

(4) 改善接头设计 在焊接接头设计上，应尽可能消除引起应力集中的因素，如避免缺口、防止焊缝的分布过分密集等。坡口形状尽量对称为宜，不对称的坡口裂纹敏感性较大。在满足焊缝强度的基本要求下，应尽量减少填充金属的用量。

埋弧焊时，焊接热影响区除了可能产生氢致裂纹外，还可能产生淬硬脆化裂纹、层状撕裂等。

4.6.3 埋弧焊焊接缺陷的产生原因及防止措施

埋弧焊接缺陷产生原因及防止措施见表 1-4-9。

表 1-4-9 埋弧焊焊接缺陷产生原因及防止措施

缺陷		产生原因	防止措施
内部缺陷	裂纹	(1) 焊丝和焊剂匹配不当(母材中含碳量高时,熔敷金属中的 Mn 减少) (2) 熔池金属急剧冷却,热影响区硬化 (3) 多层焊的第一层裂纹由于焊道无法抗拒收缩应力而造成 (4) 沸腾钢产生硫带裂纹(热裂纹) (5) 不正确焊接施工,接头拘束大 (6) 焊道形状不当,焊道高度比焊道宽度大(梨形焊道产生的收缩裂纹) (7) 冷却方法不当	(1) 焊丝和焊剂正确匹配,母材含碳量高时要预热 (2) 焊接电流增加,降低焊接速度,母材预热 (3) 第一层焊道的数目要多 (4) 采用高 Mn 高 Si 焊剂 (5) 注意施工顺序和方法 (6) 调整焊接参数,控制焊缝宽深比 (7) 进行后热
	内部气孔	(1) 坡口表面有污物 (2) 焊剂吸潮 (3) 不干净焊剂(刷子毛的混入)	(1) 清理、干燥坡口 (2) 按要求烘干焊剂 (3) 收集焊剂时用钢丝刷
内部缺陷	夹渣	(1) 下坡焊时,焊剂流入 (2) 多层焊时,在靠近坡口侧面添加焊丝 (3) 引弧时产生夹渣(附加引弧板时易产生夹渣) (4) 焊接电流过小,对于多层堆焊,渣没有完全除去 (5) 焊丝直径和焊剂选择不当	(1) 在焊接相反方向,母材水平放置 (2) 坡口侧面和焊丝之间距离至少要保证大于焊丝直径 (3) 引弧板厚度及坡口形状要与母材保持一致 (4) 提高焊接电流,保证焊渣充分熔化 (5) 提高焊接电流、焊接速度
	未熔透	(1) 电流过小(过大) (2) 电压过大(过小) (3) 焊接速度过大(过小) (4) 坡口面高度不当 (5) 焊丝直径和焊剂选择不当	(1) 焊接参数(电流、电压、焊接速度)选择适当 (2) 选定合适的坡口面高度 (3) 选定合适的焊丝直径和焊剂种类
表面缺陷	咬边	(1) 焊接速度过快 (2) 衬垫不合适 (3) 电流、电压不合适 (4) 电极位置不当	(1) 减小焊接速度 (2) 使衬垫和母材紧贴 (3) 调整电流、电压 (4) 调整电极位置
	焊瘤	(1) 电流过大 (2) 焊接速度过慢 (3) 电压太低	(1) 减小电流 (2) 加快焊接速度 (3) 提高电压
	余高过大	(1) 电流过大 (2) 电压太低 (3) 焊接速度过慢 (4) 采用衬垫时所留间隙不足 (5) 被焊工件没有放置水平位置	(1) 减小电流 (2) 提高电压 (3) 加快焊接速度 (4) 加大间隙 (5) 将被焊工件置于水平位置
	余高过窄	(1) 焊剂堆敷宽度过窄 (2) 电压过低 (3) 焊接速度过快	(1) 焊剂堆敷宽度加大 (2) 提高电压 (3) 减慢焊接速度

(续)

缺陷		产生原因	防止措施
表面缺陷	焊道表面不光滑	(1) 焊剂堆敷高度过大 (2) 焊剂粒度选择不当	(1) 调整焊剂堆敷高度 (2) 选择适当电流
	表面压坑	(1) 在坡口面有锈、油、水垢等 (2) 焊剂吸潮 (3) 焊剂堆敷高度过大	(1) 清理坡口面 (2) 按要求烘干焊剂 (3) 调整焊剂堆敷高度
	人字形压痕	(1) 在坡口面有锈、油、水垢等 (2) 焊剂吸潮	(1) 清理坡口面 (2) 按要求烘干焊剂

4.7 高速埋弧焊新工艺的特点及其设备

20 世纪 50 年代以来,就出现了多种双/多丝埋弧焊焊接方法,主要有单弧焊电源串联双丝埋弧焊、单弧焊电源并列双丝埋弧焊、双弧焊电源串列双丝埋弧焊和多弧焊电源串列多丝(最多达 10 丝)埋弧焊设备/装备。发展至今,这些方法已得到了越来越多的应用,当它的焊接速度达到或超过 1m/min,被称为高速埋弧焊。随着制造业的高速发展,企业为了提高生产效率,降低成本,纷纷引进各种先进埋弧焊装备技术。

4.7.1 单丝高速埋弧焊的工艺特点及其设备

单丝高速埋弧焊是在普通单丝埋弧焊的基础上,通过提高焊接电流和焊车/行走机构的行走速度来实现的。在单丝埋弧焊接过程中,如果焊接速度过高,则会出现一些不同于常规单丝埋弧焊的问题,例如,由于电弧的热量没有充分地向母材扩散,形成的熔池小,周围的母材温度梯度大,熔池凝固快,熔化金属来不及和母材充分熔合,导致焊缝余高大,产生咬边和金属液体失稳造成的驼峰焊道等使焊缝变差的现象,如图 1-4-45 所示。如果将焊接速度控制在一定范围内,系统运行稳定,电弧无短路、断弧出现,则焊缝成形好。

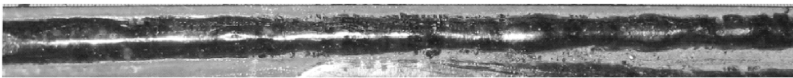


图 1-4-45 焊缝成形(一)

单丝高速埋弧焊焊缝成形的好坏,很大程度取决于焊缝所获得的热输入的大小及稳定程度。单丝埋弧焊焊缝所获得的热输入可用下式表示:

$$E_l = \eta I_f U_f / v_w \tag{1-4-23}$$

式中 E_l ——热输入,单位为 J/cm;
 I_f ——电弧电流,单位为 A;
 U_f ——电弧电压,单位为 V;
 v_w ——焊接小车行走速度,单位为 cm/s;
 η ——为热效率。

埋弧焊热效率 η 较高,可达 85% 以上。如果热输入 E_l 稳定,就表示焊缝在单位长度上所获得的热量均匀一致,焊缝成形就好,因此,埋弧焊要求焊接小车要保持速度均匀,焊接电流和电压要稳定。

1. 单丝直流高速埋弧焊

单丝直流高速埋弧焊既适合厚板钢材,也可用于 4mm 的薄板,但多数是在厚板情况下应用的。

单丝高速埋弧焊可采用单面焊接双面成形工艺，常常用在锅炉、压力容器以及其他金属构件制造中。为保证焊接质量，实际焊接时，对焊接参数以及网压的波动都有严格的要求，如果焊接参数和网压波动较大，则焊缝成形的质量就会受到明显的影响，严重时会产生裂纹、气孔、焊瘤、咬边等缺陷。因此，焊接过程中，焊接参数的稳定是保障焊缝成形和力学性能的关键。

下面是采用堆焊方法进行的单丝直流高速埋弧焊实例，所采用的是 MZ—2000 型逆变式直流埋弧焊电源，反极性接法（即 DCRP），低碳钢板，板厚 15mm， $\phi 5\text{mm}$ 焊丝，焊丝牌号 H08A，HJ431 焊剂，焊丝伸出长度 30mm，见表 1-4-10，焊缝成形如图 1-4-46 ~ 图 1-4-48 所示。

表 1-4-10 不同参数的单丝直流高速埋弧焊

图序号	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(m/min)	焊接情况
图 1-4-46	560	42	0.53	无短路、断弧,过程稳定、焊接质量好
图 1-4-47	580	40	1.0	焊接过程不稳定,焊缝出现紧缩、驼峰现象
图 1-4-48	1020	42	1.16	无短路、断弧,过程稳定、焊接质量好

焊接速度由 0.53m/min 调整到 1.0m/min 时，焊缝成形如图 1-4-47 所示，焊接过程不稳定，焊缝出现紧缩、驼峰等缺陷，原因在于：焊接电流和电弧电压一定的情况下，焊接速度决定了单位焊缝长度上的热输入，焊接速度太快，单位长度上的热输入减少，焊接过程稳定性变差。

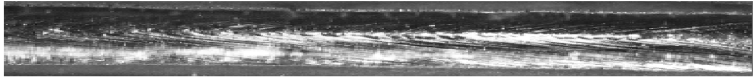


图 1-4-46 焊缝成形（二）



图 1-4-47 焊缝成形（三）

为了获得成形良好的焊道，焊接速度、电弧电压与焊接电流应该合理匹配。在焊接速度改变的同时，为了保证一定的焊缝质量，焊接电流与电弧电压按照表 1-4-10 做相应调整，如图 1-4-48 所示，与图 1-4-47 相比，焊接过程稳定，焊缝成形明显改善。

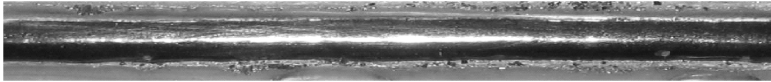


图 1-4-48 焊缝成形（四）

为了对埋弧焊电弧的稳定性进行实时监测和评估，人们常借助于现代信号处理技术，对焊接过程的电弧参数进行实测和跟踪记录，华南理工大学黄石生教授团队在开展高速高效焊接技术系统研究的同时，研发成功了的电弧动态小波分析仪，就是一种专门针对焊接信号分析而开发的信号分析仪器，它可以对电弧信号进行统计分析，以及由电流、电压数据求出其相应的概率密度分布，并以直方图的形式显示焊接电流、电弧电压的概率密度分布的大致情况。图 1-4-48 中尖峰附

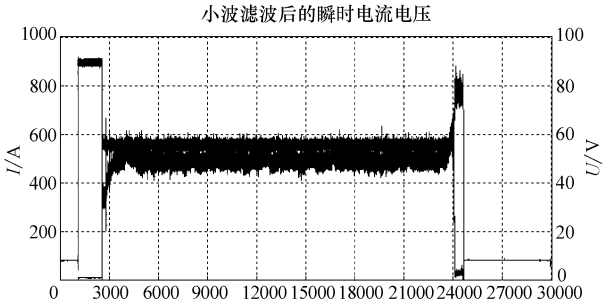


图 1-4-49 焊缝电流、电压波形图

近区域的宽窄程度以及尖峰的高低反映了波形的一致性程度和焊接过程的稳定性，因此，利用概率密度分布图可提取焊接过程稳定性的特征信息。

下面是针对图 1-4-46 的焊缝为分析对象进行的小波分析，其电流电压波形如图 1-4-49 所示，电弧的 $U-I$ 分布如图 1-4-50 所示。在电压和电流平面坐标 ($U-I$ 平面) 上，将同一次焊接试验的瞬时电压和电流值按时间的顺序依次画线连接起来，就得到 $U-I$ 图。 $U-I$ 图的重复性代表了焊接过程的稳定性，

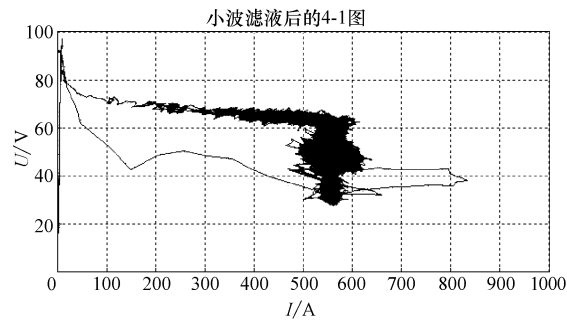


图 1-4-50 电弧 $U-I$ 图

通过 $U-I$ 图可直观地对焊接动态过程进行分析评定。从图 1-4-50 中能明显看出其边缘线族分布很集中，边缘线族清晰、整齐， $U-I$ 重复性高，说明图 1-4-46 的焊接过程稳定性很好。

概率密度分布 (PDD) 如图 1-4-51 所示。图 1-4-51a 是电弧电流概率密度分布图，从图中可以看出电弧电流 I 的最大概率密度 n 在 560A，两侧成近似对称状，图 1-4-51 b 为电弧电压概率密度分布图，图中由三部分组成，左侧小山峰代表了起弧过程电压，中间部分代表了焊接过程的电弧电压，右边山峰代表收弧电压，电流和电压 PDD 尖峰都很集中，表明是比较好的焊接参数。

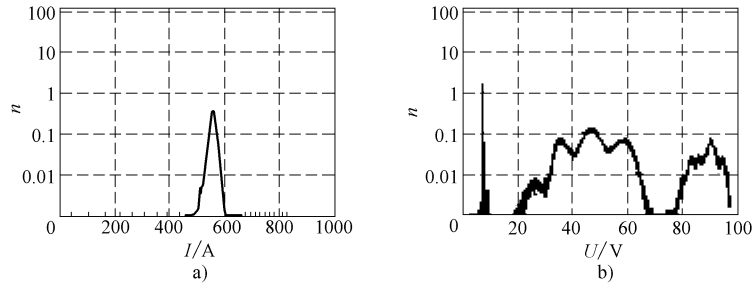


图 1-4-51 电弧电流电压概率密度分布图

a) 电流概率密度分布图 b) 电压概率密度分布图

2. 单丝交流方波高速埋弧焊

与直流埋弧焊相比，交流方波埋弧焊具有可调参数多的优点，适合特殊材料的焊接，尤其是在多丝埋弧焊中可有效消除电磁偏吹现象，保障电弧的稳定性。直流反接 (DCRP) 埋弧焊焊接时，可获得最大的熔深和最佳的焊缝表面；直流正接 (DCEP) 埋弧焊焊接时，焊丝熔化速度要比反接高 35% 以上，使得焊缝余高增加，熔深变浅。在特殊场合进行埋弧焊接过程中，需要提高相应的热量输入至母材和填充金属，保证获得高的焊缝质量和高的焊接速度，而采用交流方波弧焊电源进行埋弧焊接，可以更方便通过调节交流方波的频率、正负半波宽度比及其幅值来适应不同埋弧焊工艺的需求。

表 1-4-11 是单丝交流高速埋弧焊的几个实例，所采用的是 MZE-1800 逆变式交流埋弧焊电源，低碳钢板，板厚 15mm， $\phi 5\text{mm}$ 的焊丝，焊丝牌号 H08A，焊剂 HJ431，焊丝伸出长度 30mm，堆焊方法。

表 1-4-11 不同参数的单丝交流方波高速埋弧焊

序号	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(m/min)	频率/Hz	宽度比	焊接情况
a	800	40	1.0	50	0.3	无短路、断弧,过程稳定、焊缝成形差
b	810	41	1.0	50	0.4	无短路、断弧,过程稳定、焊接质量好
c	815	42	1.2	50	0.5	无短路、断弧,过程稳定、焊接质量好

从表 1-4-11 中可以看出, 相同焊接电流、电弧电压、频率和焊接速度条件下, 占空比较小时, 负半波电弧时间长, 对焊丝熔化作用较大, 电弧正半波电弧力作用较小, 使得焊丝熔滴敷在焊缝表面, 导致焊缝较狭长, 余高增加, 而且焊接速度过快时, 焊接过程中出现焊接不稳定现象; 随着占空比的增大, 电弧正半波电弧力作用增大, 焊接过程无短路、无断弧、焊接过程稳定、焊缝成形好, 而且焊接速度可进一步提高。

综上所述, 当交流方波埋弧焊过程中, 焊接电流、电压和频率一定时, 宽度比的大小对熔滴过渡和焊接过程的稳定性影响很大, 如果宽度比太小会加快焊丝熔化速度, 如焊接速度过快, 会引起熔滴过渡的不规则, 出现余高过大的现象。

4.7.2 双丝高速埋弧焊的工艺特点及其设备

双丝高速埋弧焊有两个电弧同时燃烧, 焊缝能够获得更大的能量 (共熔池的情况), 因此, 可实现的焊接速度更高, 焊缝获得的热输入可用下式表示:

$$E_1 = \frac{\eta(I_{\text{I1}}U_{\text{I1}} + I_{\text{I2}}U_{\text{I2}})}{v_w} \tag{1-4-24}$$

式中 E_1 ——热输入, 单位为 J/cm;
 I_{I1} 、 U_{I1} 、 I_{I2} 、 U_{I2} ——分别表示两个电弧的焊接电流和电弧电压;
 v_w ——焊接速度/焊接小车行走速度, 单位为 cm/s。

在焊接速度 v_w 和热效率 η 恒定的条件下, 焊缝热输入的稳定与否决定于 I_{I1} 、 U_{I1} 、 I_{I2} 、 U_{I2} 四个参数, 任何一个参数发生变化, 热输入就会发生变化, 焊缝成形就会受到影响。通常双丝高速埋弧焊的焊接速度可达 2m/min 以上。

1. 双丝高速埋弧焊设备

双丝高速埋弧焊设备与单丝高速埋弧焊设备所不同的是采用了两套电源和送丝机构, 焊丝矫正压紧机构和控制系统安装在一个行走机构上, 双丝埋弧焊装备系统简图如图 1-4-52 所示。

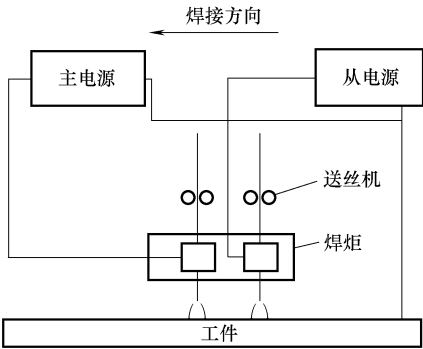


图 1-4-52 双丝埋弧焊装备系统简图

图 1-4-53 所示为高速双丝埋弧焊系统控制框图, 考虑到焊接中存在的电磁干扰因素, 该系统采用了 PLC 作为接口电路, 选用三菱 FX2N-64 点 PLC 作为数字量的接口电路, 另外还选用了两个三菱 4DA 和两个 4AD 三菱 PLC 特殊模块作为模拟量的接口电路, 由于 4DA、4AD 模块均有 4 个通道, 且 4 个通道共用一个 COM 端口。多台焊接设备共同组合在一起时, 可能产生强的电磁干扰, 使系统无法正常工作, 为了提高系统的抗干扰性, 各信号间需要不共地连接。4DA、4AD 模块与控制箱之间添加了线性隔离接口电路。上位机采用了组态软件进行监控管理, 且系统采用分布式控制, 上位机通过串口与 PLC 进行通信, 在上位机与焊机之间有 PLC 以及数字和模拟接口电路,

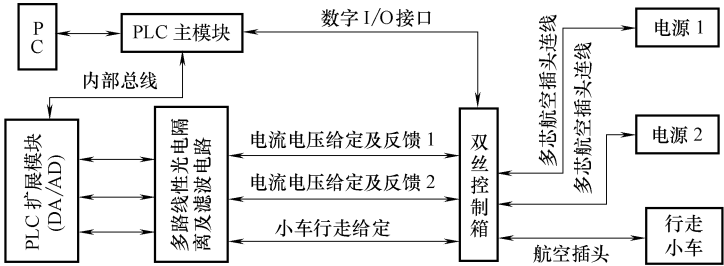


图 1-4-53 双丝高速埋弧焊系统控制框图

上位计算机控制程序对两台电源和小车发布控制指令，监控电源和小车的运行状态，监控程序采用事件命令语言编程，图 1-4-54 所示为起动键按下时的事件程序，如果系统在某时刻有某一键按下，这时系统执行其相应的事件程序。

上位机执行监控和数据管理工作，对专家数据库进行管理。在专家数据库中，包含了多种双丝埋弧焊参数，它充分体现了焊接专家的知识。数据库中参数是以配方的形式体现的，在运用过程中，操作人员可以对专家数据库进行添加、修改和删除。如有特殊要求，还可添加特殊的配方。

2. 双丝高速埋弧焊工艺方法

双丝高速埋弧焊电源可采用DC + DC 组合，也可采用 DC + AC 组合或 AC + AC 组合，采用 DC + AC 组合及 AC + AC 组合可以减小电弧间的磁偏

吹，电弧稳定性更好，因此，这里以 DC + AC 为讨论对象，焊丝间距调整原则以保证两根焊丝在一个熔池内燃烧，其特点是前丝直流电弧控制熔深、后丝交流电弧控制熔宽，可一次性获得焊缝成形，焊接过程中的关键在于焊接参数的匹配，包括前后焊丝间距，前、后两电弧焊接参数匹配等。表 1-4-12 为华南理工大学黄石生教授团队开发的一组双丝高速埋弧焊实例，以 MZ—2000 型直流（DCRP 接法）逆变式和 MZE—1800 型交流方波逆变式弧焊电源组合而成，焊接工件为低碳钢板材，板厚 20mm，前丝 $\phi 5\text{mm}$ ，后丝 $\phi 4.8\text{mm}$ ，焊丝牌号 H08A，焊剂 HJ431，堆焊方法，焊缝效果如图 1-4-55 所示，焊接过程无短路、无断弧、焊接过程稳定，起弧顺畅，焊缝成形良好。

表 1-4-12 不同焊接参数的双丝高速埋弧焊

序号	焊接电流/A		电弧电压/V		焊接速度 /(m/min)	伸出长度/mm		倾角/(°)		焊丝间距 /mm	焊接情况
	导前丝	跟踪丝	导前丝	跟踪丝		导前丝	跟踪丝	导前丝	跟踪丝		
a	910	770	42	43	1.4	28	28	10	-2	30	过程稳定
b	1080	810	42	44	2.0	28	28	10	-2	33	过程稳定

为了保证焊缝头、尾熔宽尽量一致和减少收弧位置下塌程度，对两台电源的起弧和收弧分别进行时序控制，其时序关系如图 1-4-56 所示，焊接起动时前丝先起弧，后丝经一定延时后起弧，后丝延时起弧时间等于两根焊丝间距除以焊接速度，输入焊丝间距 l ，经计算得出 3 组试验数据，后面焊丝延时起弧时间分别为 1.3s、1s 和 1s；焊接结束时前丝先收弧，后丝经一定延时而再收弧，经计算得出 3 条焊缝后丝收弧延时时间分别为 1.3s、1s 和 1s。焊接开始时，前丝所处位置为 B 点，后丝所处位置为 A 点，引燃前丝电弧，按预先选定的焊接速度等进行焊接，当后丝移到 B 点位置时，引燃后丝电弧。焊接过程在监控系统的作用下自动选择预设的焊接参数，如焊接电流、电弧电压、焊接速度等进行焊接，并保证这些焊接参数在整个焊接过程中稳定。焊接结束时，前丝电弧移到 D 点位置，立即停止前丝送丝，并切断前丝电源，行走机构继续行走，当后丝电弧移到 D 点位

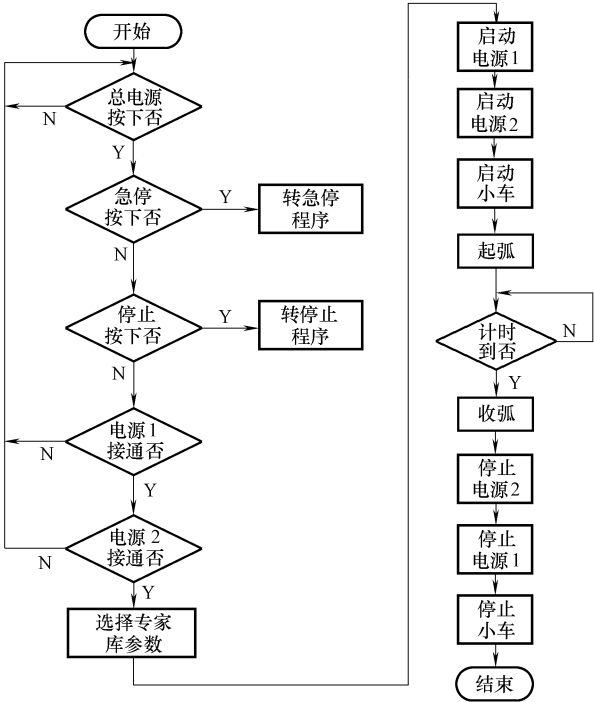


图 1-4-54 起动键存在时的程序框图

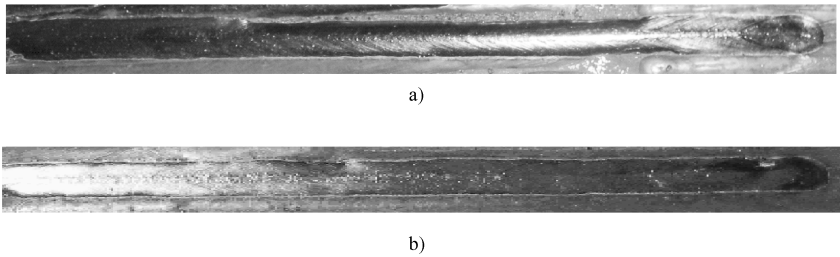


图 1-4-55 不同焊接参数条件下的双丝高速埋弧焊缝

- a) 导前丝: $I_f=910\text{A}$, $U_f=42\text{V}$; 跟踪丝: $I_f=770\text{A}$, $U_f=43\text{V}$; 焊接速度: $v_w=1.4\text{m/min}$
b) 导前丝: $I_f=1080\text{A}$, $U_f=42\text{V}$; 跟踪丝: $I_f=810\text{A}$, $U_f=44\text{V}$; 焊接速度: $v_w=2.0\text{m/min}$

置时,先停止行走和降低焊接电流、电弧电压,利用电弧回烧填满弧坑,最后切断后丝电源和送丝。通过对两电源及行走机构进行时序关系的控制,可避免双丝串列埋弧焊在起弧和收弧位置由于在电弧作用下,所产生的焊缝首尾下塌现象。传统的双丝埋弧焊常在开始位置会产生一小段距离较窄的焊缝,且收弧位置常出现下塌现象。

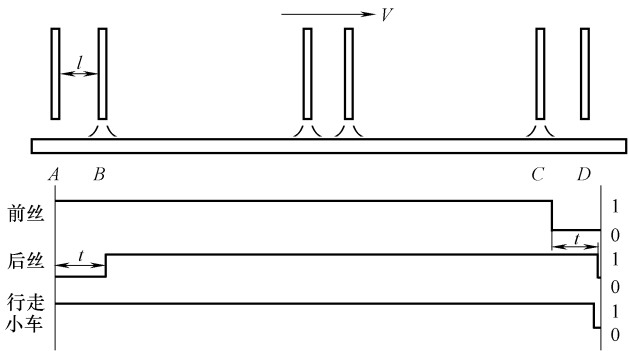


图 1-4-56 双丝埋弧焊时序控制图

4.7.3 三丝高速埋弧焊的工艺特点及其设备

在多丝埋弧焊的应用中,最常见的是三丝埋弧焊,如美国 Lincoln 公司的三丝埋弧焊装备,特别适合厚大钢板工件的焊接。传统的三丝埋弧焊一般采用一台晶闸管式或硅整流式电源和两台普通的正弦波交流电源,并与专用三丝焊枪、直流伺服驱动的送丝机和行走机构等组合成三丝高速埋弧焊焊接装备。三丝高速埋弧焊电源可采用多种组合,如 AC + AC + AC 或 DC + AC + AC 等组合,但通常采用 DC + AC + AC 组合的情况比较普遍。三丝共熔池高速埋弧焊有 3 个电弧同时燃烧,焊缝能够获得比双丝高速埋弧焊更多,因此,可实现的焊接速度更高,焊缝获得的热输入可用下式表示:

$$E_1 = \frac{\eta(I_1 U_1 + I_2 U_2 + I_3 U_3)}{v_w} \tag{1-4-25}$$

式中 I_1 、 U_1 、 I_2 、 U_2 、 I_3 、和 U_3 ——分别为 3 个电弧的电流和电压。

在焊接速度 v_w 和热效率 η 恒定的条件下,焊缝热输入的稳定与否决定于 I_1 、 U_1 、 I_2 、 U_2 、 I_3 、和 U_3 六个参数,任何一个参数发生变化,热输入就会发生变化,焊缝成形就会受到影响。

在双丝高速埋弧焊系统的基础上,添加一套交流弧焊电源和送丝机构,将双丝高速埋弧焊接系统升级为三丝高速埋弧焊系统,实现三丝共熔池高速埋弧焊。现以华南理工大学在国家自然科学基金会支持下所取得的研究成果为例作简介。焊接时可根据具体要求,调节三个焊枪的位置,以保证共熔池,但距离也不能太近,以减轻电弧间干扰,维持电弧的稳定,表 1-4-13 列出了三丝高速埋弧焊的两个实例,全部采用逆变式“DC + 方波 AC + 方波 AC”弧焊电源组合,试验条件为:“DC2000A + 方波 AC 1800A + 方波 AC 1250A”逆变式埋弧焊电源组合,直流采用 DCRP 接法,低

碳钢板，板厚 20mm；前面焊丝 $\phi 5\text{mm}$ ，中间焊丝 $\phi 4.8\text{mm}$ ，后面焊丝 $\phi 4\text{mm}$ ，焊丝牌号 H08A，三根焊丝相互间距分别为 30mm、32mm，三把焊枪空间位置如图 1-4-57 所示；焊剂 HJ431，两交流方波电源占空比均设为 0.5，堆焊方法。

由表 1-4-13 可知，通过改变参数，得出不同特征的焊缝，每条焊缝的参数略有不同，但它们的焊接速度均超过了 2.0m/min ，焊接过程稳定、焊缝成形良好。

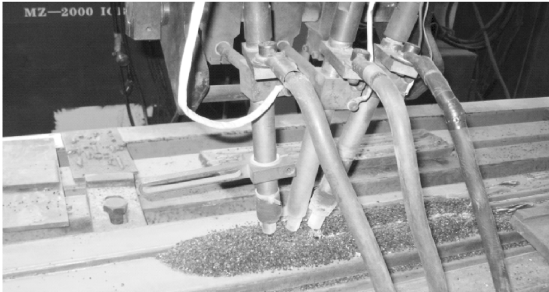


图 1-4-57 三丝焊枪空间位置

表 1-4-13 不同参数的三丝高速埋弧焊

序号	焊接电流/A			焊接电压/V			伸出长度/mm			倾角/°			焊接速度/(m/min)	焊接情况
	前丝	中丝	后丝	前丝	中丝	后丝	前丝	中丝	后丝	前丝	中丝	后丝		
a	990	830	740	40	42	44	32	30	32	10	0	-10	2.5	稳定、质量好
b	1040	900	780	40	42	44	32	30	32	10	0	-10	2.8	稳定、质量好

在 DC + AC + AC 组合时，为了减小电弧间磁偏吹，需合理调整交流电弧间的相位差，如果同频率的两交流方波电源的相位差为 0° 时，则两电弧相互吸引，如果相位差为 180° 时，则两电弧相互排斥，因此，为了减小电弧间的相互作用，最好将两电弧的相位差固定在 90° 左右，如图 1-4-58 所示。而在 AC + AC + AC 组合时，三个弧焊电源之间相位差应该互为 120° 。

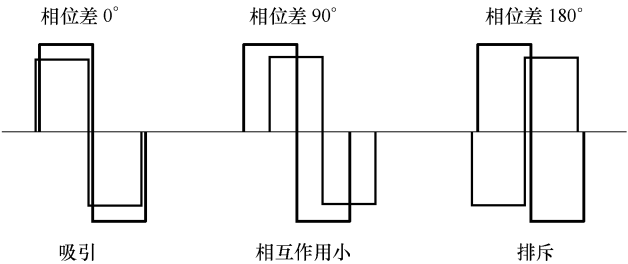


图 1-4-58 两电弧不同相位差时的相互作用

高速埋弧焊也可应用于薄板钢材的焊接，但需要根据式（1-4-23）、式（1-4-24）和式（1-4-25）调整焊接的参数，减小焊丝直径，降低焊接电流，合理设定小车行走速度，减小焊缝的热输入，否则热输入过大，易出现焊穿薄板等缺陷。有技术文献报道，有技术人员利用埋弧焊实现了厚度为 3mm 和 4mm 钢板的高速埋弧焊。

4.7.4 四丝高速埋弧焊在管线钢焊接中的应用

我国西气东输工程采用了直缝埋弧焊管，其中 X70 级管线钢，壁厚 14.5 ~ 26.2mm，直径 914 ~ 1118mm，采用的是双面四丝埋弧直缝钢管。实际应用中，为了避免因焊缝硬度大而产生裂纹，应选用强度稍低于母材的焊接材料，即选用低匹配的接头形式，这样可以提高焊缝的韧性，减少产生裂纹的倾向，改善焊缝的综合力学性能。选择埋弧焊剂时，考虑到焊缝金属 Mn/Si 比与焊缝金属冲击韧度的正相关关系，需选用 Mn/Si 值稍高的焊剂，速度高时，还应考虑选用高速焊剂。如选用 H08C 焊丝和氟碱型烧结高速焊剂 SJ-101G，X70 管线钢和 H08C 埋弧焊丝的化学成分见表 1-4-14 和表 1-4-15。

表 1-4-14 X70 管线钢的化学成分 (质量分数, %)

元素	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	V	Cu
质量分数	0.050	1.490	0.150	0.020	0.006	0.018	0.011	0.136	0.033	0.010
元素	Nb	W	Al	As	B	N	Ti	Co	Fe	
质量分数	0.020	0.010	0.024	0.005	0.001	0.002	0.014	0.00	98.00	

表 1-4-15 H08C 埋弧焊丝化学成分 (质量分数,%)

元素	C	Mn	Si	P	Cr	Ni	Cu	S	Ti
质量分数	0.068	1.37	0.07	0.018	0.01	0.28	0.10	0.08	0.06

实施多丝直缝埋弧焊时，需合理选择坡口形式，并用刨边机刨坡口，坡口的角度和尺寸见表 1-4-16，预焊前要求接缝处间隙小于 1mm，错边小于 1mm，坡口两边 50mm 内清洗干净，无水、油、锈和其他脏物。实际采用外预焊、内焊、外焊的顺序。外预焊采用 CO₂ 气体保护焊，内外焊采用四丝埋弧焊，并采用 DC + AC + AC + AC 电源组合，交流电源采用特定的柯斯特接法，以减少电弧间的相互干扰。焊接时，距焊件端部一定距离引弧和熄弧（80 ~ 100mm），或加上 250 ~ 300mm 引弧板、引出板，实际焊接时主要考虑的因素有以下方面：

(1) 焊接电流 焊丝增加，焊缝的余高将增加。但不同的焊丝增加程度有所不同，第一根丝的电流最大的变化相对于其他三丝将引起较大的余高变化，而第二、三根丝相对于第四丝又要大些，同样第一根焊丝电流对熔深影响最大，第二、三根焊丝作为对焊缝的填充作用，对焊缝的熔深影响相对小一些，而第四根焊丝对熔深几乎没有影响。

(2) 焊接电压 所有焊丝的电压对焊缝余高和熔宽都有一定的影响，特别是交流焊丝的电压对焊缝与母材的过渡状况影响较大，电压过低将使之不能形成平滑过渡。

(3) 焊接速度 焊缝的熔深和熔宽都有影响，余高影响相对来说小些。焊接速度越快，熔深和熔宽越小，反之越大。如对 $\delta=32\text{mm}$ 中厚板，采用不同的焊接速度焊接试件正反两面，焊接速度为 1.3m/min 时熔宽为 15 ~ 16mm，焊接速度为 1.084m/min 时熔宽为 20mm，而焊缝的余高几乎没有变化。

(4) 弧焊电源接法 不同的弧焊电源接法，焊缝断面成形差别较大。接法不同，电弧间干扰程度也不同。交流弧焊电源接线时注意各交流焊接电缆的相位关系，以保证电弧间干扰最小。

焊丝中心一定要排列在焊缝中心线上，否则会因焊丝排列不在一条直线上而形成摆动电弧，造成正反面焊缝中心错位缺陷。另外，焊丝倾角和间距对焊缝的余高和电弧的稳定也影响较大。

表 1-4-17、表 1-4-18、表 1-4-19 是三组焊接工艺的实际参数。三组焊管都采用了 CO₂ 焊进行预焊，其参数为：焊丝（CHW - 50C8） $\phi 1.6\text{mm}$ ，电弧电流 $I_f=250 \sim 300\text{A}$ ，电弧电压 $U_f=25\text{V}$ ，焊接速度 $v_w=0.9\text{m/min}$ ，CO₂ 气体流量 $Q=20 \sim 25\text{L/min}$ 。

表 1-4-16 直缝焊钢管坡口参数

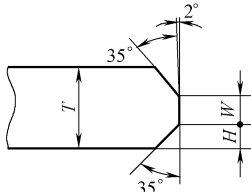
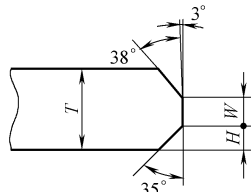
								
T/mm	23.8	25.4	28.6	17.5	19.1	20.6	23.8	25.4
W/mm	8	8	8	6	7	7	8	8
H/mm	8	10	11	6	7	8	9	10

表 1-4-17 厚度 $\delta=17.5\text{mm}$ 的 X70 直缝钢管焊接参数

	焊丝序号	极性	焊丝直径/mm	焊丝伸出长度/mm	间距 mm	倾角(°)	电流/A	电压/V	焊接速度/(m/min)
内焊	1	直流反接	4	28	18 19 18	14	960	32	1.84
	2	交流	4	25		2	850	34	
	3	交流	4	30		-4	730	38	
	4	交流	4	28		-14	725	38	
外焊	1	直流反接	4	26	19 20 17	14	1000	32	2.1
	2	交流	4	24		2	850	34	
	3	交流	4	24		-4	750	36	
	4	交流	4	26		-14	600	38	

表 1-4-18 厚度 $\delta=21\text{mm}$ 的 X70 直缝钢管焊接参数

	焊丝序号	极性	焊丝直径/mm	焊丝伸出长度/mm	间距/mm	倾角/(°)	电流/A	电压/V	焊接速度/(m/min)
内焊	1	直流反接	4	30	15 17 20	15	990	32	1.6
	2	交流	4	32		4	700	37	
	3	交流	4	28		-7	600	40	
	4	交流	4	27		-13	500	41	
外焊	1	直流反接	4	31	17 18 19	15	1050	32	1.9
	2	交流	4	32		4	760	37	
	3	交流	4	30		-7	660	39	
	4	交流	4	31		-13	570	43	

表 1-4-19 厚度 $\delta=26.2\text{mm}$ 的 X70 直缝钢管焊接参数

	焊丝序号	极性	焊丝直径/mm	焊丝伸出长度/mm	间距/mm	倾角/(°)	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(m/min)
内焊	1	直流反接	4	30	15 17 20	15	1050	32	1.53
	2	交流	4	30		4	890	36	
	3	交流	4	30		-7	760	37	
	4	交流	4	28		-13	740	38	
外焊	1	直流反接	5	28	17 18 19	15	1170	33	1.4
	2	交流	5	26		4	910	35	
	3	交流	4	26		-7	750	36	
	4	交流	4	25		-13	635	40	

参考文献

- [1] 巴顿. 埋弧焊接指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1959.
- [2] 姜焕中. 电弧焊及电渣焊 [M]. 修订本. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [3] 美国金属学会. 金属手册: 第六卷 焊接与钎焊 [M]. 8 版. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [4] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册: 第一卷 焊接方法及设备 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [5] 李鹤岐, 等. 国内外埋弧焊的发展状况 [J]. 电焊机, 2006 (4): 1-6.
- [6] 吴树雄, 尹士科, 李春范. 金属焊接材料手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1978.
- [7] 俞尚知. 焊接工艺人员手册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1991.
- [8] 安藤弘平, 长谷川光雄. 焊接电弧现象 [M]. 增补版. 施雨湘, 译. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [9] 美国焊接学会. 焊接手册: 第二卷 焊接方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [10] EASB 公司. HNG Welding date. 2009.
- [11] 天津大学焊接教研室. 金属焊原理及工艺 上册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1979.
- [12] 陈伯鑫. 金属焊接性基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [13] 陈伯鑫. 焊接工程缺欠分析与对策 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1978.
- [14] 吴志祥, 江强. LNG 储罐中 9% Ni 钢埋弧自动横焊的探讨 [J]. 安装, 2006 (1): 42-45.
- [15] 何宽芳. 双电弧高速埋弧焊工艺优化及过程数字化协同控制研究 [D]. 广州华南理工大学, 2009.
- [16] 周滴清. 高速埋弧焊过程控制及其电弧信号的小波分析 [D]. 广州华南理工大学, 2008.
- [17] 李季. 自动埋弧焊对薄板的焊接 [J]. 齐齐哈尔大学学报, 2005 (10): 104.
- [18] 杨兵兵. 埋弧自动焊工艺参数控制 [J]. 金属铸锻焊技术, 2009 (6): 164-165.
- [19] 黄石生, 何宽芳, 等. MZ2000/MZE1800/MZE1250 多电弧高速节能埋弧焊装备关键技术. 电焊机. 2009. (1).
- [20] 林文彬, 葛玉宏, 吕世俊, 等. X70 直缝钢管四丝埋弧焊焊接工艺研究 [J]. 焊管, 2002, 25 (4): 21-24.

第 5 章 熔化极气体保护电弧焊

本章重点介绍了熔化极气体保护电弧焊（Gas Metal Arc Welding，简称 GMAW）的原理与工艺特点，对弧焊电源、焊枪/焊炬、送丝机及其驱动等辅助设备与配件的配置以及气体、焊丝的选用进行了说明，简介了药芯焊丝 CO₂ 焊、特殊气体保护焊及高效高速气体保护电弧焊等技术。

5.1 熔化极气体保护电弧焊的原理、特点及应用

气体保护电弧焊（简称气体保护焊）有熔化极和非熔化极两种。熔化极气体保护电弧焊（GMAW）是在气体保护下，焊丝与工件之间形成的电弧不断熔化焊丝及母材形成熔池，冷却后形成焊缝的一种焊接方法。由于它效率高，对工件的热输入低及易实现焊接自动化等优点，而得到广泛应用。

5.1.1 熔化极气体保护电弧焊的分类

焊接采用的保护气体是惰性气体时，如氩气（Ar）或氦气（He），称为熔化极惰性气体保护电弧焊（Metal inert-gas arc welding，简称 MIG）；采用的保护气体中加入了一定量的活性气体，比如在氩气中加入了少量的二氧化碳（CO₂）、氧气（O₂），称为熔化极混合气体保护电弧焊（Mixed gas welding，简称 MAG）；保护气体是由两种或两种以上的惰性气体，如氩气与氦气，按一定的比例组成的混合气体，通常也称为混合气体保护电弧焊。如果采用纯 CO₂ 气体作为保护气体，通常称为二氧化碳气体保护焊（CO₂ shielded arc welding，简称 CO₂ 焊）。

GMAW 用焊丝分为实心焊丝和药芯焊丝两类。通常按焊丝类型及保护气体种类进行分类，见表 1-5-1。

表 1-5-1 熔化极气体保护电弧焊（GMAW）的分类

弧焊方法	按焊丝分类	按保护气体分类	保护气体
GMAW	实心焊丝气体保护电弧焊	CO ₂ 焊	CO ₂
			CO ₂ + O ₂
		MIG	Ar
			He
			Ar + He
		MAG	Ar + CO ₂
			Ar + O ₂
			Ar + CO ₂ + O ₂
	药芯焊丝电弧焊	药芯焊丝气体保护电弧焊	CO ₂
			CO ₂ + Ar
		药芯焊丝自保护电弧焊	—

5.1.2 熔化极气体保护电弧焊的基本原理

1. 工作原理

GMAW 的原理如图 1-5-1 所示。弧焊电源的两极分别接焊丝及工件。焊接时先从喷嘴送出保护气体，隔绝空气的危害；然后送丝，焊接电流通过焊枪内的导电嘴传导给焊丝，在焊丝与工件之间引燃电弧，电弧熔化焊丝及母材形成熔池金属，冷却后即形成了焊缝。为保证电弧连续稳定燃烧，

焊丝由送丝机内的送丝轮向前连续送进，从焊丝盘拉出的焊丝经送丝软管内的送丝管进入焊枪。

2. 弧焊电源种类、极性及外特性

弧焊电源通常采用直流反极性（DCEP），即焊丝接正极、工件接负极。这是因为焊丝接负极时电弧不稳定，飞溅大，焊缝成形不良。通常不用正弦波交流弧焊电源，其原因主要是电流过零时电弧熄灭后不易再次引燃且电弧不稳定。

弧焊电源采用平特性，以增强电弧的自身调节能力，保持焊接电弧和工艺过程的稳定性。

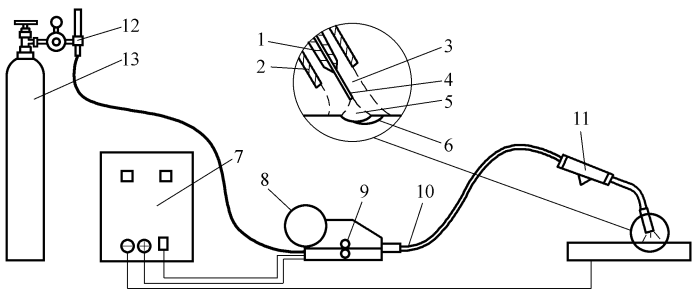


图 1-5-1 熔化极气体保护焊示意图

- 1—导电嘴 2—喷嘴 3—保护气体 4—焊丝 5—电弧
6—熔池 7—焊接电源 8—焊丝盘 9—送丝轮
10—电缆 11—焊枪 12—气体调节器 13—气瓶

5.1.3 熔化极气体保护电弧焊的熔滴过渡及冶金特性

1. 熔滴过渡及其影响因素

GMAW 熔滴过渡的形式是影响电弧稳定性的主要因素之一，通常可分为 3 种，分别为短路过渡（short circuiting transfer）、喷射过渡（spray transfer）及粗滴过渡（globular transfer）。影响熔滴过渡的因素很多，其中主要有电流大小和种类、电弧电压、焊丝直径与成分、保护气体及焊丝伸出长度等。焊接电流与电弧电压对熔滴过渡的影响如图 1-5-2 所示。

（1）短路过渡 短路过渡是指焊丝端部的熔滴与熔池短路接触，由于强烈过热和电磁收缩的作用使熔滴爆断，直接向熔池过渡的形式。

短路过渡是在使用细直径焊丝（直径 $\leq 1.2\text{mm}$ ）及较小的焊接电流与电弧电压条件下发生的。短路过渡过程及相应的焊接电流与电弧电压波形如图 1-5-3 所示。电弧引燃后，焊丝迅速熔化形成电弧空间，熔滴悬浮在焊丝端头，如图 1-5-3e 所示；此时为防止电弧不稳定及在短路前发生熔滴

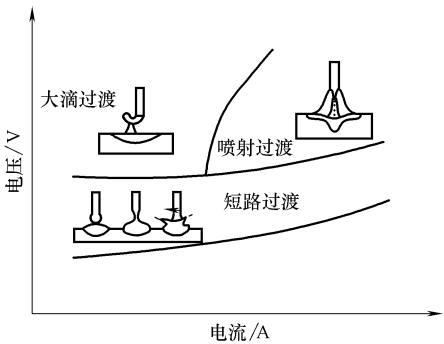


图 1-5-2 焊接电流与电弧电压对熔滴过渡的影响

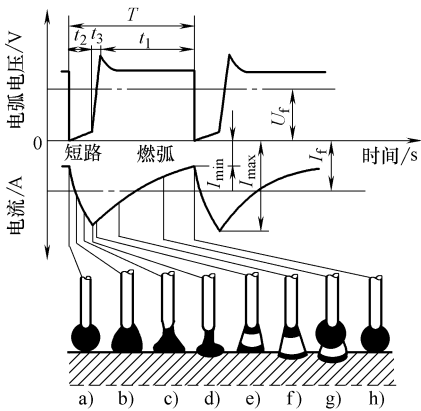


图 1-5-3 短路过渡过程示意图及波形图

- t_1 —燃弧时间 t_2 —短路时间 t_3 —电压恢复时间
 T —焊接循环周期 $I_{\max}$ —短路峰值电流 $I_{\min}$ —最小电流
 I_i —平均焊接电流 U_i —平均电弧电压

过渡,保持较小的电弧电压是必要的。随着焊丝不断熔化,熔滴不断长大且因焊丝熔化速度降低,熔滴迅速接近熔池,如图1-5-3f、g所示。

当熔滴与熔池接触发生短路时,电弧熄灭,如图1-5-3h、a所示;此时电弧电压骤然下降接近于零,在焊丝与熔池之间形成金属柱,如图1-5-3b、c所示。随着短路电流的急剧上升,强烈的电磁收缩及表面张力使金属液柱形成缩颈,即“小桥”,如图1-5-3d所示。当短路电流达到一定值时,“小桥”因过热汽化迅速爆断,电弧电压重新恢复到空载电压以上,电弧重新引燃并重复上述过程。熔滴过渡只发生在焊丝与熔池接触的瞬间,而在电弧空间则不发生熔滴过渡。

短路过程中“小桥”爆断会产生焊接飞溅。短路电流上升速度过高将产生较大的飞溅,需要采取一些方法来限制短路电流,例如在焊接回路中使用电感线圈来抑制电流上升速度,不同直径的焊丝使用的回路电感值不同。此外还可采取波形控制法、能量控制法等电弧控制技术来降低焊接飞溅,详见5.5.1节。

为稳定焊接过程,要求熔滴越小、过渡越快越好,即短路频率越高越好。高频率的短路过渡,产生的飞溅细小,不会粘到工件上,对稳定焊接过程是有利的。通常短路的频率为20~200次/s。

电弧电压对短路过渡的频率有重要的影响,如图1-5-4所示。对于直径为0.8~1.6mm的焊丝,CO₂焊时最佳的电弧电压为20V左右。

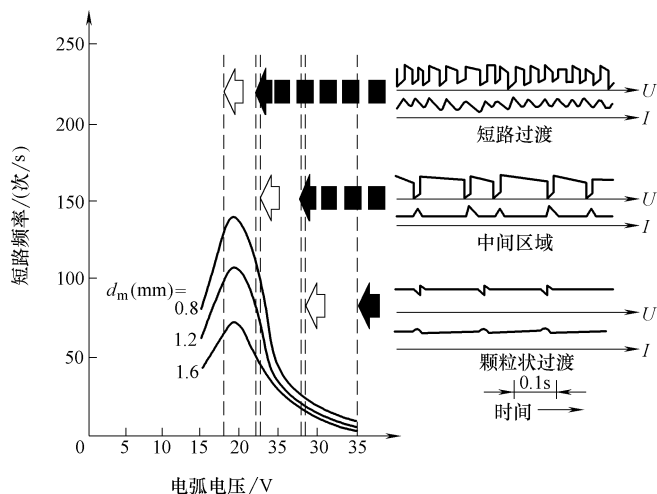


图1-5-4 电弧电压对短路过渡频率的影响

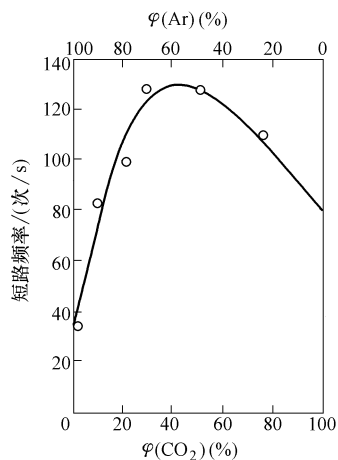


图1-5-5 Ar-CO₂ 混合比
对短路过渡频率的影响

保护气体成分是影响短路过渡频率的重要因素之一,它对弧柱电场强度及熔化金属的表面张力大小均产生影响。当保护气体的成分发生变化时,电弧形态随之发生变化,影响熔滴过渡的表面张力也随之发生变化,从而引起短路过渡频率的变化。Ar-CO₂ 气体混合比对短路过渡频率的影响如图1-5-5所示。

短路过渡形式因其熔池小且凝固速度快、焊道熔深较小及焊接变形小,特别适合焊接薄板以及全位置焊接,也可用于较大间隙的搭桥焊接。

(2) 喷射过渡 喷射过渡是指熔滴呈细小颗粒并以喷射状态快速通过电弧空间向熔池过渡的形式,熔滴直径等于或小于焊丝直径,如图1-5-6所示。

喷射过渡是在高电流、高电压及合适的保护气体成分条件下发生的。当电流超过某一临界电流后,电磁力和等离子流力促使熔滴摆脱焊丝端部液态金属表面张力的束缚,呈小滴状以每秒几十滴甚至几百滴的速度过渡到熔池中。应当说明的是,当电流刚达到或超过临界电流时,熔滴直径与焊

丝直径相当，熔滴高速射向熔池，形成喷射过渡；随着电流的继续增加，熔滴变得更细小，沿弧柱轴向形成高速液体流束射向熔池，这种过渡形式为喷射过渡。熔滴过渡频率与焊接电流的关系如图 1-5-7 所示。

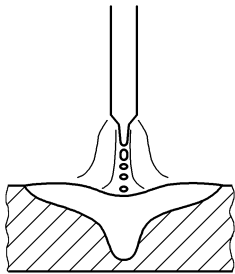


图 1-5-6 喷射过渡示意图

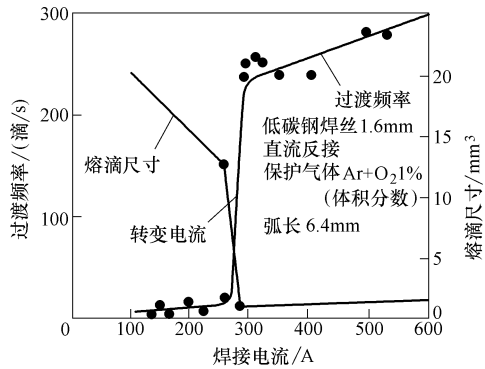


图 1-5-7 对熔滴过渡频率与焊接电流的关系

影响临界电流大小的因素主要有焊丝成分、保护气体成分、焊丝直径及焊丝伸出长度等。一般导电性好的焊丝其临界电流值低一些，如图 1-5-8 所示。保护气体成分对产生喷射过渡有很大的影响。使用纯氩或在纯氩中加入少量的 CO_2 、 O_2 的混合气体时，临界电流较低，易得到完全的喷射过渡。随着混合气体中 CO_2 或 O_2 的比例的增加，临界电流越来越大，实现喷射过渡越来越困难。使用纯 CO_2 不能得到完全的喷射过渡。保护气体成分对临界电流的影响分别如图 1-5-9、图 1-5-10 所示。相同材质的焊丝直径越大，其临界电流越大；焊丝伸出长度越小，其临界电流越大。焊丝直径及其伸出长度对临界电流的影响如图 1-5-11 所示。

电弧电压必须足够高才能形成喷射过渡。喷射过渡形式因无短路过程、电弧非常稳定、飞溅小、焊道熔深大（指状）、焊缝成形好及焊丝熔化效率高等特别适合在水平位置焊接厚板。

(3) 粗滴过渡 粗滴过渡是指熔滴以较大颗粒、在重力作用下脱离焊丝通过电弧空间向熔池过渡的形式，熔滴尺寸大于焊丝直径。

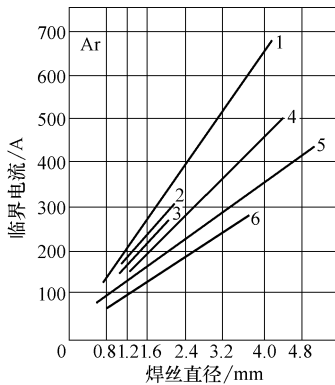


图 1-5-8 几种焊丝的临界电流

1—低碳钢 (99% Ar + 1% O_2 ，体积分数) 2—钛 (Ar) 3—不锈钢
99% Ar + 1% O_2 ，体积分数) 4—铜 (Ar) 5—铝合金 (Ar) 6—铝 (Ar)

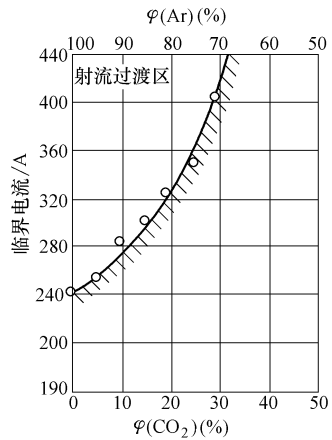


图 1-5-9 Ar- CO_2 气体混合比例
对临界电流的影响

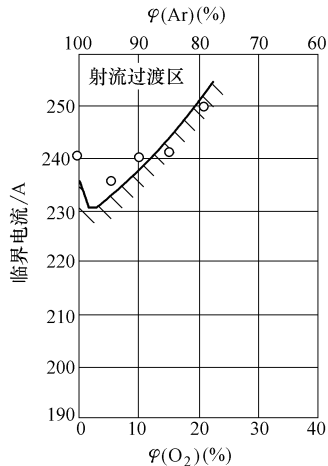


图 1-5-10 Ar- O_2 气体混合比例对临界电流的影响

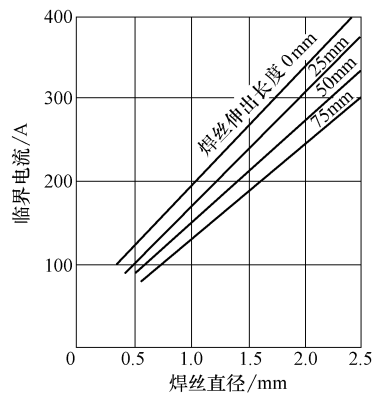


图 1-5-11 焊丝直径及伸出长度对临界电流的影响（低碳钢、99% Ar + 1% CO_2 （体积分数）、直流反接、弧长 6mm）

在较小焊接电流时，无论使用何种保护气体，均能产生粗滴过渡。当保护气体为惰性气体或在惰性气体中加入了少量的活性气体时，若电流小于临界电流及电压高于短路过渡时的电压，能得到粗滴过渡。这种过渡形式飞溅较大且易产生未熔合、未焊透等焊接缺陷，实际生产应用受到限制。

无论是短路过渡、喷射过渡，还是使用惰性气体或惰性气体中加入了少量的活性气体时产生的粗滴过渡，熔滴过渡的轨迹都是沿着焊丝轴向的；但当使用 CO_2 作为保护气体时，若焊接电流及电压超过短路过渡的范围，则产生非轴向的粗滴过渡，其原因是阻碍熔滴过渡的力使熔滴偏离焊丝轴线，如图 1-5-12 所示。阻碍熔滴过渡的力包括电磁收缩力、电子撞击力及斑点外金属蒸气的反作用力。因为斑点只占熔滴底部的局部区域，阻碍熔滴过渡的力支撑熔滴且使熔滴在脱离焊丝之前就偏离轴线，甚至上翘，所以熔滴脱离焊丝后，一般不能沿焊丝轴向过渡。非轴向过渡的过程很不稳定，极易产生飞溅且焊缝成形不良，无法用于焊接生产。

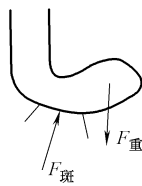


图 1-5-12 非轴向大滴过渡示意图

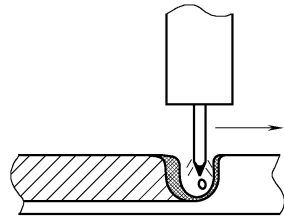


图 1-5-13 CO_2 焊潜弧状态的熔滴过渡

使用直径 1.6mm 以上的粗丝，在较大的电流和较低的电压 CO_2 焊时，形成潜弧状态能得到稳定的焊接过程，如图 1-5-13 所示。此时焊丝伸入到工件表面以下，电弧深入到熔池底部，排开液态金属形成空腔，在空腔内形成潜弧状态。潜弧状态是一个稳定的状态，熔池金属包围了电弧，电弧的热量更充分地加热焊丝和母材，电弧空间充满了金属蒸气，电弧电场强度降低。焊丝表面的阴极斑点由集中向分散变化，即电弧将由焊丝端头向上爬。由于电弧形态的改变，改变了焊丝端头的受热及受力条件，从而形成了喷射过渡形式。电弧被熔池凹坑所包围，飞溅金属大都被凹坑内壁所捕获，实际上飞溅很少。潜弧焊熔深大、熔敷效率高，已广泛用于较厚工件的焊接。

2. 冶金特性

(1) CO_2 气体高温氧化性及其对合金元素过渡的影响 在电弧高温的作用下, CO_2 分解成 CO 及原子态 O , 具有强烈的氧化性:



因而 CO_2 焊过程中, 电弧气氛中同时存在着 CO_2 、 CO 和 O 三种成分。温度越高, CO_2 分解度越大, CO_2 分解度与温度的关系如图 1-5-14 所示。在这三种成分中, CO 在高温下既不溶解于金属, 又不与金属发生反应, 但 CO_2 与 O 能与铁及其他合金元素, 如 C 、 Mn 、 Si 、 Cr 、 Ni 、 Ti 等发生化学反应, 烧损这些合金元素, 使过渡到焊缝中的合金元素减少, 从而影响焊缝的性能。

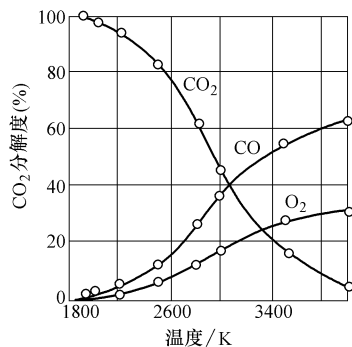
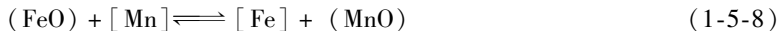


图 1-5-14 CO_2 分解度与温度的关系

焊接区域的温度极不均匀, 在不同的位置发生不同的冶金反应。在温度较高的电弧空间和接近电弧的熔池中将发生如下反应:



在远离电弧温度较低的熔池中将发生如下反应:



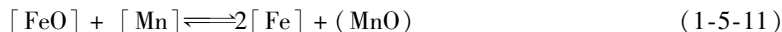
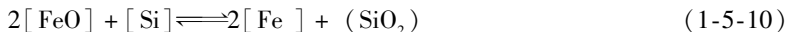
式中 $[\quad]$ ——表示液态金属的反应物;

$(\quad)$ ——表示渣中的反应产物。

因此高温下 CO_2 及其分解的氧均具有强烈的氧化性。随着温度的提高, 其氧化性增强。

(2) CO_2 焊的脱氧措施 CO_2 焊电弧强烈的氧化性, 使铁及合金元素发生了烧损。虽然生成的 SiO_2 、 MnO 等会浮到熔池表面形成熔渣, 但过渡到焊缝中的合金元素减少, 将降低焊缝金属力学性能; 同时反应过程中产生了 CO 气体, 会增大飞溅并可能残留在焊缝中形成气孔。

CO_2 焊必须采取必要的脱氧措施。通常在焊丝中加入足够数量的脱氧元素, 这些脱氧元素与氧的亲合力比 Fe 、 C 大, 能优先与氧发生反应并还原 FeO 。常用的脱氧元素是 Si 和 Mn , 其脱氧反应为



脱氧产物 SiO_2 、 MnO 能结合成复合化合物 $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$, 其熔点为 1543K , 密度为 3.6g/cm^3 , 能够聚集成大块浮在熔池表面, 凝固后在焊缝表面形成少量焊渣。单独采用 Si 脱氧时, 生成的 SiO_2 熔点高且颗粒小, 不易从熔池中浮出, 易引起焊缝夹渣; 而单独使用 Mn 脱氧, 其脱氧能力小, 生成的 MnO 密度大, 也不易从熔池中浮出。因此采用 Si 和 Mn 联合脱氧效果更好。

加入到焊丝中的 Si 和 Mn , 在焊接过程中一部分用于脱氧还原 FeO , 一部分被直接氧化和蒸发掉, 其余部分作为合金元素过渡到焊缝中。为达到良好的脱氧及合金化效果, 焊丝中 Si 和 Mn 的比例必须适当。常用焊丝 ER49—1 中 Mn 的质量分数为 $1.80\% \sim 2.10\%$ 、 Si 的质量分数为 $0.65\% \sim 0.95\%$; 焊丝 ER50—6 中, Mn 的质量分数为 $1.40\% \sim 1.85\%$ 、 Si 的质量分数为 $0.80\% \sim 1.15\%$ 。

表 1-5-2 给出了 CO₂ 焊时一部分元素的过渡系数。Al、Ti 是最活泼的元素，从表 1-5-2 可以看出 Al、Ti 比 Si 和 Mn 过渡系数小很多，在焊接过程中更易被氧化。因此有一些焊丝中还加入了 Al 和 Ti 等元素进行先期脱氧，从而减少 Si 和 Mn 的烧损。Ti 除了能先期脱氧外，加入适量时还能稳定电弧、减少飞溅及细化晶粒，从而改善焊缝的力学性能。

表 1-5-2 各种元素 CO₂ 焊时的过渡系数

元 素	过渡系数(%)	元 素	过渡系数(%)
C	50 ~ 235	Nb	60 ~ 70
Al	30 ~ 40	B	100
Ti	40	S	100
Si	50 ~ 70	P	100
V	60	Fe	90
Mn	60 ~ 75		

(3) CO₂ 焊焊缝的气孔及防止措施 焊缝产生气孔的主要原因是 在熔池 中存在着过饱和的气体，随着熔池的凝固，若这些气体来不及逸出就会在焊缝内形成气孔，从而显著降低焊缝的力学性能。CO₂ 焊焊缝可能产生的气孔主要有一氧化碳气孔、氢气孔和氮气孔 3 种。

1) 一氧化碳气孔的来源有三个方面：一是电弧高温条件下 CO₂ 分解产生的 CO 气体，见式 (1-5-1)。二是若脱氧元素不足，会有更多的 FeO 进入熔池中。从式 (1-5-9) 可知，在熔池中 FeO 可与 C 发生反应生成 CO。这个反应通常在凝固的后期反应更为激烈，如熔池的尾部。由于熔池温度较低的区域已开始凝固，CO 气体不易逸出，从而在焊缝中形成气孔。三是 CO₂ 气体中混入 CO 杂质，在焊接过程中有可能进入熔池。

如果焊丝中有充足的脱氧元素，如 Si、Mn、Al、Ti 等，则脱氧元素将先与 FeO 反应（见式 (1-5-10)、式 (1-5-11)），从而防止 CO 的产生。从式 (1-5-9) 可知，限制焊丝中 C 的含量有利于防止 CO 气孔。CO₂ 焊用焊丝在设计时，充分考虑到了这些因素的作用。因此实际生产过程中，只要正确选择焊丝，焊丝中的脱氧元素就会先与 FeO 发生反应，从而有效地防止 CO 气孔。

通常 CO 气孔产生在焊缝金属内部，沿结晶方向分布，呈条虫状，表面光滑。

2) 氢可以溶解在液态金属中。当熔池中存在被溶解的氢时，在熔池金属凝固的瞬间，氢的溶解度急剧减少，若这些气体来不及从熔池中逸出，则会残留在焊缝中形成气孔。

电弧中氢的来源主要有两方面：一是来自焊丝与工件表面的水、油污、锈与漆等；二是来自 CO₂ 气体中所含的水分。在电弧高温下，油污、锈及水分均能分解产生氢。CO₂ 气体中含水量与焊缝金属的氢含量的关系见表 1-5-3。随着 CO₂ 气体含水量的增加，焊缝金属的氢含量也增加。为防止产生氢气孔，一方面在焊前应清理工件表面水、油污与锈等杂质，并防止焊丝被沾污和生锈；另一方面应对 CO₂ 气体提纯与干燥。试验表明：当 CO₂ 气体的纯度（体积分数）达到 99.11% 以上时就能得到无氢气孔的焊缝。大部分国家规定，焊接用 CO₂ 气体纯度（体积分数）不低于 99.5%。

此外，工艺上采取加大焊接电流，降低焊接速度也能减少氢气孔。

表 1-5-3 CO₂ 气体中含水量与焊缝金属的氢含量的关系

CO ₂ 气体含水量/(g/m ³)	焊缝金属的氢含量/(mL/100g)	CO ₂ 气体含水量/(g/m ³)	焊缝金属的氢含量/(mL/100g)
0.85	2.9	1.92	4.7
1.35	4.5	15.00	5.5

需要说明的是，CO₂ 焊实际上是一种低氢的焊接方法，其熔敷金属含氢量比焊条电弧焊、埋弧焊要低得多，见表 1-5-4。这是因为 CO₂ 焊电弧气氛具有强烈的氧化性，CO₂ 分解出的氧原子可与进入焊接区的氢原子结合形成不能溶解在熔池中的羟基，从而削弱了氢的有害作用。因此只要焊前对焊丝及工件表面的油污、铁锈等杂质清理干净，同时使用的 CO₂ 气体纯度（体积分数）不低于 99.5%，一般不会产生氢气孔，可以得到低氢甚至超低氢的焊缝。焊缝中扩散氢含量是产生冷裂纹

的重要因素之一，对低合金钢采用 CO₂ 焊是有利的。

氢气孔常产生在焊缝的表面，断面多为螺钉状，气孔内壁光滑。

表 1-5-4 焊接碳钢时熔敷金属含氢量

焊接方法		扩散氢/(mL/100g)	备 注
焊条电弧焊	纤维素型	35.8	
	钛型	39.1	
	钛铁矿型	30.1	
	氧化铁型	32.3	
	低氢型	4.2	
埋弧焊		4.54	烧结焊剂
CO ₂ 气体保护焊		0.04	

3) 氮气孔是 CO₂ 焊最易出现的气孔。如果焊接过程中气体保护不良，空气中的氮就会侵入电弧和熔池，熔池冷却凝固前来不及逸出就会在焊缝中形成气孔。气体流量过小或过大、喷嘴内飞溅太多引起流量变小且不均匀、焊接过程中有侧风及喷嘴到工件之间距离过大等因素都可以引起氮气孔，应根据具体产生的原因采取相应的措施解决，如调节保护气体到合适的流量、及时清理喷嘴内飞溅、采取防侧风措施及降低喷嘴高度等。

氮气的另一个来源是不纯的 CO₂ 气体。若 CO₂ 气体中有较多的氮气，也会在焊缝中产生氮气孔。选用含 Al、Ti 的焊丝利用其固氮作用可防止氮气孔。

氮气孔通常出现在焊缝表面，呈蜂窝状，或者以弥散形式的微气孔分布在焊缝金属中。

(4) CO₂ 焊的飞溅问题 CO₂ 焊一个突出的问题是飞溅。在小电流短路过渡时，由于飞溅颗粒小，一般不易粘在工件表面，可能不需要清理，其危害不大；但在粗滴过渡或粗丝大电流焊接时，飞溅多且颗粒大，其有害作用增大。一是易粘在工件表面且难以去除，增加了清理飞溅的工序和清理时间；二是明显增加焊丝及电能消耗；三是可能会因粘在导电嘴和喷嘴表面引起送丝和送气不畅，引起熄弧并中断焊接过程，产生气孔。这些危害降低了生产效率，增加了焊接成本。

1) 产生飞溅的原因 产生飞溅的原因主要有以下几个方面：

① 一氧化碳 (CO) 气体膨胀爆破产生的飞溅。焊接过程中，熔滴熔池中的碳被氧化成 CO 气体。随着温度的升高，CO 气体膨胀外逸，若此时受到阻碍就会使熔滴熔池发生爆破，从而产生大量飞溅。

② 阴极斑点压力引起的飞溅。一般发生在直流正极性的情况下，此时工件接正极，焊丝接负极，正离子从工件飞向焊丝末端以较大的冲击力撞击熔滴，电极斑点压力大。若长弧焊接，焊丝末端易形成粗大熔滴并产生非轴向过渡，易产生大颗粒的飞溅。正因为如此，CO₂ 焊通常采用直流反接，焊接过程中电子撞击熔滴，产生的飞溅较小。

③ 短路过渡不正常引起的飞溅。电弧燃烧转为短路时，电流迅速增大，如果短路电流增长速度过快或太慢，都会产生大量的飞溅。短路电流增长速度适宜时可以减少飞溅，同时短路过渡稳定性也最佳，这需要焊机有良好的动特性。

④ 焊接参数不当引起的飞溅。电弧电压过高对飞溅影响很大。电弧电压过高，焊接电流小，弧长增大，易引起焊丝末端熔滴长大，电弧不稳定，会引起较大的飞溅。可见适宜的电弧电压与焊接电流才能保证飞溅最小。CO₂ 焊电弧电压对飞溅率的影响如图 1-5-15 所示。

熄弧时若焊丝末端形成大的熔球，则再次引弧时将产生较大飞溅。此外，磁偏吹、焊丝直径、保护气体成分及焊枪

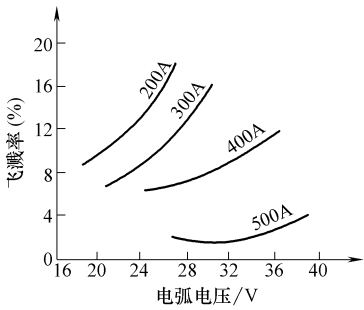


图 1-5-15 CO₂ 焊电弧电压对飞溅率的影响 (焊丝直径 2mm)

角度等对飞溅都有影响。

2) 减少飞溅的措施 根据对 CO_2 焊产生飞溅原因的分析, 一般采取以下措施来减少飞溅:

① 正确地选择焊接电流与电弧电压。焊接电流处于正常短路过渡和喷射过渡范围内时飞溅均较小, 而在大滴过渡时飞溅较大。因此, 选择焊接电流时应注意避开飞溅率较大的区域, 同时焊接电流与电弧电压应有适宜的匹配。

② 选择合适的保护气体。纯 CO_2 气体保护时, 飞溅较大。对于飞溅要求严格时, 可以使用混合气体。以氩气与 CO_2 混合气体为例, 通常在 100A 焊接电流以下短路过渡时, CO_2 气体中加入 50% 的氩气 (体积分数), 飞溅明显改善; 随着加入氩气的增加, 飞溅还会进一步降低。

③ 选择含碳量低的焊丝或活化焊丝。选择含碳量低的焊丝, 能减少焊接过程中产生的 CO 气体, 从而减少飞溅。活化焊丝因在焊丝的表面涂有一层很薄的碱金属、碱土金属或其化合物, 可以提高焊丝的电子发射能力, 焊接过程更稳定。药芯焊丝焊接时, 飞溅比实心焊丝低很多。

④ 采用直流反极性进行焊接。一般短路过渡及长弧焊接时, 选择直流反极性接法。这时电弧稳定, 飞溅最小。因此 CO_2 焊应用最多的就是直流反接。但在高速 CO_2 焊、堆焊及铸铁补焊时, 使用直流正接时为减少飞溅宜使用活化焊丝。

⑤ 选择合适的电感值。为减少飞溅, 通常在焊接回路串入一直流电感, 来限制短路时的电流增长速度。电感越大, 短路电流增长速度越小。焊丝直径越大, 短路电流增长速度越大。细焊丝熔化速度快, 熔滴过渡的周期短, 因此需要较大的电流增长速度, 电感值应调小一些。粗焊丝焊接时, 情况正好相反, 电感值应调大一些。

⑥ 采用具有电流波形控制功能的电源, 适当控制短路电流上升斜率, 可以减少飞溅。选择具有消熔球功能 (FTT) 的焊机将有助于控制熄弧时熔球的尺寸, 减少再引弧时的飞溅。

⑦ 采用药芯焊丝可显著减少飞溅。

(5) MIG 焊及 MAG 焊的冶金特点 与 CO_2 焊相比, MIG 焊及 MAG 焊因电弧空间无氧化性或氧化性相对较低, 对合金元素的烧损相对少一些, 因此合金元素的过渡系数较大。混合气体中 CO_2 含量的变化对合金元素的过渡系数的影响如图 1-5-16 所示, 可见随着 CO_2 含量的增加, 合金元素的过渡系数减小。

保护气体为纯氩时, 电弧漂移不稳定, 焊缝容易产生气孔。通常在纯氩中加入少量的活性气体, 如 O_2 或者 CO_2 , 不仅电弧稳定, 减少气孔而且临界电流较低, 易得到喷射过渡, 飞溅减少。在短路过程时, 氩气在电弧中的电场强度比 CO_2 低, 电弧的阳极斑点面积容易扩展, 熔滴受力均匀。短路时, 电磁力和表面张力均促使熔滴向熔池过渡, 短路时间短且短路峰值电流小, 飞溅也比 CO_2 焊少。

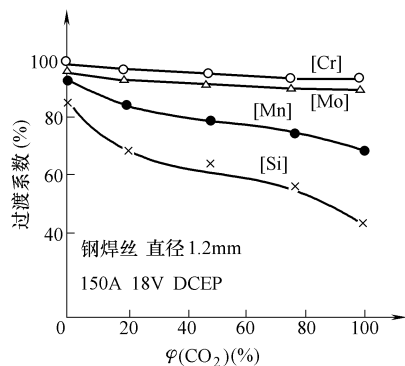


图 1-5-16 Ar- CO_2 混合气体中 CO_2 含量对合金元素过渡系数的影响

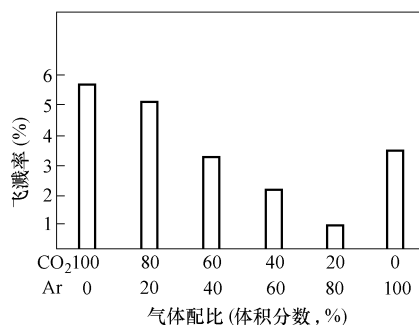


图 1-5-17 Ar- CO_2 不同混合比时的飞溅率 (焊丝直径 1.2mm, 焊接电流 350A)

MAG 焊时,冶金反应生成的 CO 少、短路电流峰值降低,因此飞溅比 CO₂ 焊少。氩与 CO₂ 混合气体不同混合比的飞溅率如图 1-5-17 所示。在测试的几种混合气体中,采用 Ar 80% + CO₂20% (体积分数),保护气体时,飞溅率最低。

欧美多采用 Ar 90% + CO₂10% (体积分数)的混合气体,可以进一步降低喷射过渡的临界电流和飞溅率。

5.1.4 熔化极气体保护电弧焊的特点及应用

1. MIG 焊的特点

(1) MIG 焊采用惰性气体保护 惰性气体包围焊接区域只是隔绝空气,不会与熔滴、熔池金属发生反应,也不溶解于熔融金属,电弧区域无氧化性,焊接过程中不产生熔渣。因此这种方法可以焊接大多数的金属,尤其适用于铝、铜、钛及其合金和不锈钢的焊接。

(2) 生产效率高 与 TIG 焊相比,由于连续送丝,许用电流密度较高,焊接熔深大,填充金属熔敷速度快,因而生产效率高。

(3) 可焊工件厚度范围和焊接参数范围宽 MIG 焊可实现不同的熔滴过渡形式,如短路过渡、喷射过渡及滴状过渡,可焊接的工件厚度范围较宽,适宜全位置焊接,焊缝成形美观且焊接变形小。

(4) 对铝合金工件表面氧化膜不敏感 MIG 焊一般采用直流反接,依靠其很强的阴极清理作用,可自动去除工件表面的氧化膜,焊前甚至可以不用增加清理氧化膜的工序。

(5) 容易实现自动化生产 MIG 焊是明弧焊接,焊接过程稳定,便于检测和控制,易实现自动化生产。

MIG 焊的缺点也是明显的。保护气氛氧化性小,MIG 焊对工件表面的油、锈等引起的气孔敏感性比 CO₂ 焊大,焊前必须清理;惰性气体价格高,为 CO₂ 价格的 2~3 倍,增加了焊接成本,通常只用于不锈钢和有色金属的焊接。

2. MAG 焊的特点

(1) 电弧具有氧化性 MAG 焊保护气体中混合了一定比例的活性气体,电弧具有氧化性,因此 MAG 焊不适宜铝、镁、铜、钛及其合金的焊接,主要用于碳钢及低合金钢的焊接。CO₂ 焊虽然焊接成本较低,但随着对产品外观质量要求的提高,越来越多地被 MAG 焊所取代。

(2) 生产效率高 MAG 焊的熔敷效率高于 CO₂ 焊,如图 1-5-18 所示。

(3) 可焊工件厚度范围宽 根据不同的混合比,可实现不同的熔滴过渡形式,可焊接的工件厚度范围较宽,适合全位置焊接,焊缝成形美观,且焊接变形小。

(4) 焊接参数的可选范围大 与 CO₂ 焊相比,MAG 焊接薄板时焊接参数的可选范围大,如图 1-5-19 所示,实线为采用 Ar 80% + CO₂20% (体积分数)混合气体保护焊时的焊接参数范围,虚线为采用 CO₂ 气体时焊接参数范围。实线的范围比虚线的范围大很多,焊接质量更容易控制。

(5) 易实现自动化生产

MAG 焊的主要缺点是因保护气体中含有较多的惰性气体,焊接成本比 CO₂ 焊高一些。

3. CO₂ 焊的特点

(1) 电弧具有很强的氧化性 CO₂ 焊主要用于碳钢及低合金钢的焊接,也可用于某些不锈钢以及药芯焊丝的焊接。

(2) 焊接成本低 这是 CO₂ 焊的突出优点,与焊条电弧焊综合比较成本约降低 50% 以上。

(3) 生产效率高 选用粗丝(直径 1.6mm 以上)焊接时,在大电流条件下可实现喷射过渡,焊丝熔化系数大,生产效率高,但其熔敷效率比 MIG 焊与 MAG 焊低。

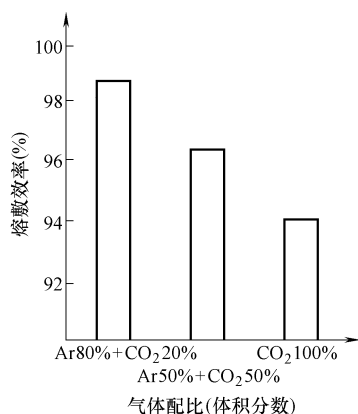


图 1-5-18 Ar-CO₂ 不同混合比时的熔敷效率
(焊丝直径 1.2mm, 焊接电流 300A)

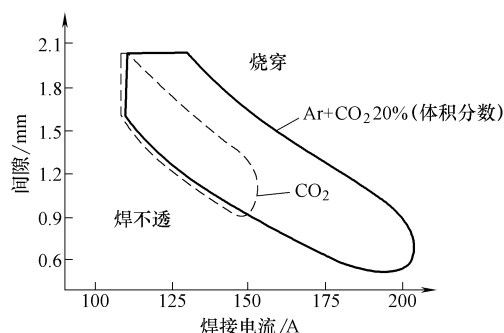


图 1-5-19 可获得优质焊缝的焊接参数范围
(板厚 3.2mm, 焊丝直径 1.2mm, 对接 I 形单面焊)

(4) 可焊工件厚度范围宽 采用短路过渡方式时, 可以焊接薄板及全位置焊接且焊接变形小。采用粗丝喷射过渡时可焊接中厚板。

(5) 具有低氢焊接性能 CO₂ 焊是一种低氢的焊接方法, 焊缝扩散氢含量低, 冷裂纹敏感性较低, 对焊前降低工件预热温度有利。

(6) 保护气体氧化性较强 对工件及焊丝表面油、锈等杂质不敏感。

(7) 易实现自动化生产

CO₂ 焊的主要缺点是飞溅较大, 焊缝成形比 MIG、MAG 焊差, 不能焊接易氧化的有色金属。

由于上述特点, 目前 GMAW 已广泛用于航空航天、核能、造船、石油化工、汽车制造、冶金、机械制造、电力、仪表、建筑等行业, 部分取代了焊条电弧焊及埋弧焊, 成为一种常用的焊接方法。

5.2 熔化极气体保护电弧焊的设备组成及其原理

5.2.1 熔化极气体保护电弧焊设备的分类与组成

GMAW 设备按操作方式主要分为半自动焊与自动焊两种。所谓半自动焊是指焊丝自动送给, 焊枪由人工操作。自动焊是指焊丝送给、焊枪行走均自动进行, 但除智能自动控制外, 一般对准焊缝仍需人工对焊枪进行调节。图 1-5-20 为一种自动熔化极气体保护电弧焊设备组成示意图。

弧焊设备通常由弧焊电源、送丝机、焊枪、供气系统及控制系统等组成。当采用水冷焊枪时设备还包括水冷系统。自动焊设备还配有机械机构及控制箱。送丝机、焊枪及焊丝盘通常安装在机械机构的行走小车上, 而行走小车则安装在悬臂梁上由电动机驱动。

MAG 焊、MIG 焊与 CO₂ 焊的设备组成大部分相同。所不同的主要是 CO₂ 焊供气系统增加了预热器及干燥器, MAG 焊设备增加了混合气体配比器。

5.2.2 弧焊电源的选配原则

GMAW 弧焊电源的选择原则如下:

1. 弧焊电源的外特性与调节性能

GMAW 弧焊电源外特性有平特性 (恒压)、陡降型 (恒流) 及缓降型 3 种。

由于细丝 (直径 1.2mm 及以下) 焊时电弧具有很强的自身调节作用, 因此一般选用平特性的

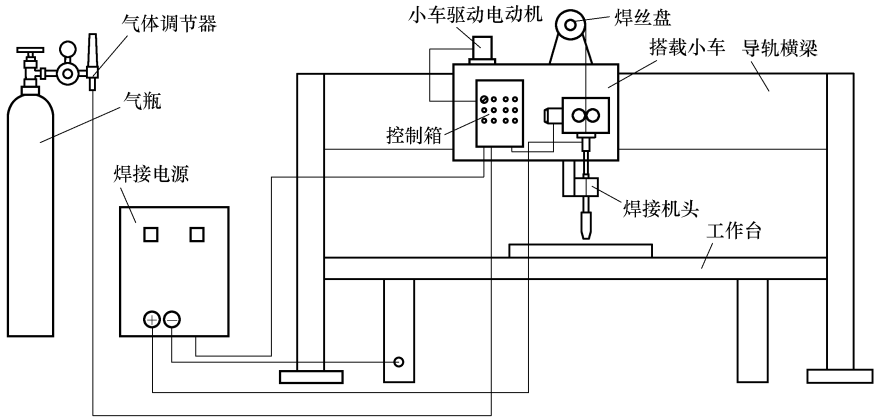


图 1-5-20 自动熔化极气体保护焊设备组成示意图

弧焊电源，配等速送丝机构。其优点在于焊接过程中当受外界因素影响，弧长发生变化时，由于电弧自身调节作用很强，能迅速恢复到原来长度。通过改变送丝速度可调节焊接电流，改变弧焊电源外特性可以调节电弧电压，实现 GMAW 所需的调节性能。

对于铝及铝合金焊丝（直径小于 1.6mm 以下）焊接时，其熔滴过渡形式为喷射过渡与短路过渡的混合形式，一般采用平特性或缓降特性的电源，选配等速送丝机构，依靠较强的自身电弧自调节作用，能获得稳定的焊接过程，同时改善焊缝成形。

粗丝焊时，由于电弧自身调节作用弱，一般采用陡降特性的电源，配均匀送丝机构，利用弧压反馈调节保持弧长稳定。

2. 弧焊电源的动特性

短路过渡要求电源具有良好的动特性。一方面要求弧焊电源能保证合适的短路电流增长速度及短路电流峰值，另一方面要求能保证空载电压具有足够的恢复速度。目前 GMAW 用弧焊电源均能满足短路过渡时对空载电压增长速度的要求。对短路电流增长速度及短路电流峰值可采用波形控制或在焊接回路中串入电抗器进行调节。

3. 弧焊电源类型及技术参数

GMAW 用弧焊电源按电流输出种类可分为直流及直流脉冲电源。目前工业上常用的有抽头式硅弧焊整流器、晶闸管式弧焊整流器、弧焊逆变器、直流脉冲弧焊电源、数字化控制的弧焊电源等。这些弧焊电源的原理及特点详见第 2 章。

弧焊电源选配除考虑外特性、调节性能与动特性外，还应根据焊接工艺的需要及焊接场所的条件，确定对弧焊电源技术参数要求。这些技术参数包括输入电压（包括电压、频率及相数）、额定焊接电流、空载电压、负载持续率、焊接电流范围及负载电压范围等。

5.2.3 其他辅助设备、配套件的选配

1. 送丝系统

MIG 焊、MAG 焊及 CO₂ 焊用送丝系统基本构成是相同的。送丝系统通常由送丝机、送丝软管及焊丝盘等组成，其中送丝机包括送丝电动机、减速器、矫直轮和送丝轮，如图 1-5-21 所示。

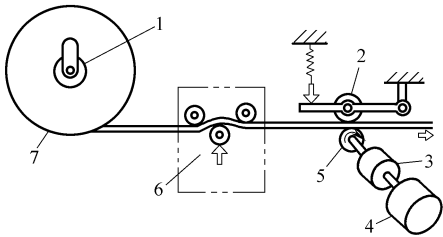


图 1-5-21 送丝系统示意图

1—焊丝盘转轴 2—送丝轮（从动轮） 3—减速器 4—送丝电动机 5—送丝轮（驱动轮） 6—焊丝矫直轮 7—焊丝盘

焊接过程中送丝必须顺畅稳定,才能保证电弧稳定,否则会影响焊接质量。根据送丝速度调节方式的不同,送丝系统分为等速送丝和均匀送丝两种,其中均匀送丝通过弧压反馈保证送丝的稳定性和。

(1) 送丝机 送丝机可分为推丝式、拉丝式、推拉丝式及加长推丝式4种,如图1-5-22所示。

1) 推丝式:焊丝从焊丝盘经过送丝轮再经过送丝软管到达焊枪,如图1-5-22a所示。推丝式送丝机结构简单、操作维修方便,目前生产中应用最广泛,适宜于直径0.8~2mm的焊丝。

2) 拉丝式:拉丝式送丝机的优点是送丝稳定。这种送丝机可分为3种形式。第一种是焊丝盘与焊枪分开,如图1-5-22b所示。第二种是焊丝盘、送丝轮及送丝电动机均装在焊枪上,但因增加了焊枪重量,操作者劳动强度大,如图1-5-22c所示,操作比第一种方便。第一种与第二种适宜直径不超过0.8mm的细丝半自动焊。第三种是焊丝盘、送丝电动机均与焊枪分开,如图1-5-22d所示,一般用于自动GMAW。

3) 推拉丝式:这种送丝方式因同时采用推丝和拉丝,同时拉丝速度稍快于推丝,焊丝在送丝管中保持拉直状态,减少了摩擦力,送丝软管长度可达15m,如图1-5-22e所示。这种送丝方式大多用于铝合金的焊接,其缺点是焊枪重,操作者劳动强度大。

4) 加长推丝式:这种送丝方式是在推丝式的基础上,在送丝软管中间加装辅助推丝机来增强送丝稳定性,如图1-5-22f所示。这种送丝方式可使送丝软管的长度增加到20m以上,同时不会增加焊枪重量,在长距离焊接时应用更为方便。

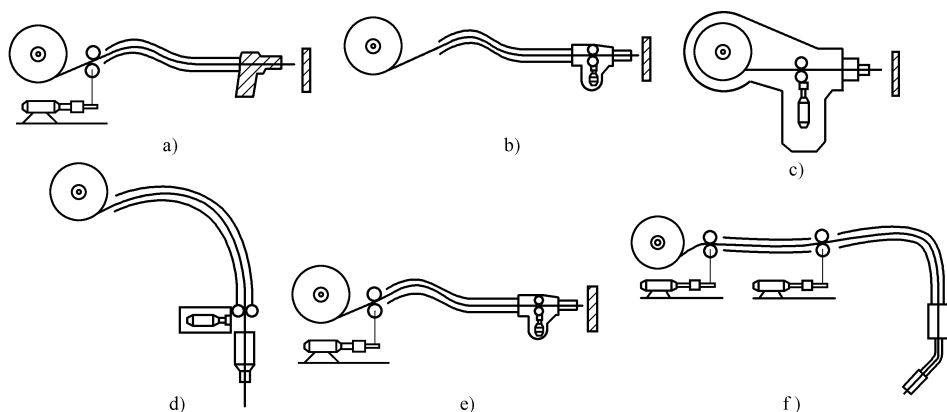


图 1-5-22 送丝机的4种基本形式示意图

a) 推丝式 b) 拉丝式(焊丝盘与焊枪分离) c) 拉丝式(焊丝盘与焊枪一体) d) 拉丝式(焊丝盘、送丝电动机均与焊枪分开) e) 推拉丝式 f) 加长推丝式

(2) 送丝轮 送丝轮的主要作用是维持焊丝的稳定送进,它与加压轮、矫直轮等安装在一起,可分为双轮式和四轮式两种,如图1-5-23所示。双轮式有两种,一种是两轮中一个为驱动轮,另一个为从动轮,如图1-5-23a所示;另一种是两轮均为驱动轮。四轮式中有两个驱动轮,另两个为从动轮,如图1-5-23b所示。

驱动轮由送丝电动机驱动,

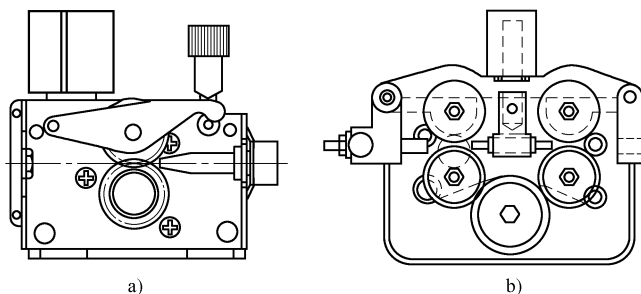


图 1-5-23 送丝驱动形式

a) 双轮式 b) 四轮式

送丝轮与焊丝之间的摩擦力推动焊丝向前输送。双轮驱动的优点在于解决了单轮驱动从动轮易打滑的问题，同时送丝推力增加一倍，焊丝因受力对称减少了在送进过程中的偏摆，提高了送丝稳定性。在送丝能力相同的情况下，四轮式送丝对焊丝的压紧力小于双轮式，因此四轮式送丝适用于较软的焊丝，如铝焊丝与药芯焊丝等。通过加压手柄可以调节送丝轮间压力以提高送丝稳定性，但压力过大时，会把焊丝压变形，反而影响送丝稳定性。

为增大摩擦力提高送丝稳定性，一般在驱动轮表面上加工 V 形槽或 U 形槽，槽的大小与焊丝直径相匹配，如图 1-5-24a 所示。使用时应根据不同直径的焊丝选择相配的驱动轮。U 形槽与焊丝之间接触面较大，更适宜较软的铝焊丝及药芯焊丝的焊接。

在驱动轮上加工带滚花的沟槽可以增加摩擦力，如图 1-5-24b 所示，其优点在于滚轮可以以较小的压力产生较大的摩擦力，缺点是易在焊丝表面产生压痕，增加在送丝软管内的阻力及导电嘴的磨损。这种驱动轮常用于粗丝 CO₂ 焊及堆焊用药芯焊丝。

(3) 送丝软管 送丝软管的作用是将焊丝导向焊枪，因此一方面要求软管送丝阻力小，保证送丝的稳定性；另一方面要求软管有足够的柔性且不易折弯，方便操作。对碳钢、低合金钢及不锈钢等较硬焊丝一般选用弹簧管，这种送丝软管是用弹簧钢丝绕制的；对于铝及铝合金等较软焊丝一般选用聚四氟乙烯或尼龙材料制成的送丝软管。送丝软管内径过大或过小均会影响送丝稳定性，可按表 1-5-5 选配。

表 1-5-5 送丝软管内径与焊丝直径的选配

焊丝直径/mm	0.8 ~ 1.0	1.0 ~ 1.4	1.4 ~ 2.0	2.0 ~ 3.5
软管内径/mm	1.5	2.5	3.2	4.7

送丝软管一般长达 3 ~ 5mm，当送丝软管过分弯曲、变形、过度磨损或者管内铜屑积垢引起堵塞时，均会增大送丝阻力，影响送丝稳定性，应定期清理或更换。推丝式送丝机不适合软管较长的场合。

一般送丝软管常与保护气体软管、焊接电缆制造成一体式焊接软管，使用更为方便。

2. 焊枪

(1) 焊枪的分类 GMAW 用焊枪，按应用方式可分为半自动焊枪和自动焊枪。按焊枪外形可分成鹅颈式、直管式和手枪式。按冷却方式可分为气冷式和水冷式（焊接电流大于 600A）。按送丝方式可分为推丝式和拉丝式。一般直管式焊枪与水冷式焊枪常用于自动焊，鹅颈式焊枪常用于半自动焊，但也可用于自动焊。

在半自动焊中，鹅颈式焊枪应用最多，一般随机标准配置的焊枪均为鹅颈式。鹅颈式焊枪适宜直径 0.8 ~ 1.6mm 细焊丝的焊接，对空间位置的焊缝操作起来比较方便。手枪式焊枪由于结构紧凑，送丝阻力小，适合较粗焊丝。

焊枪主要由导电嘴、喷嘴、枪体等组成。鹅颈式焊枪的组成如图 1-5-25 所示，手枪式焊枪的组成如图 1-5-26 所示，均为推丝式焊枪。

CO₂ 气体具有较强的冷却作用，允许使用的额定电流较高，一般不需要水冷。但在 MIG、MAG

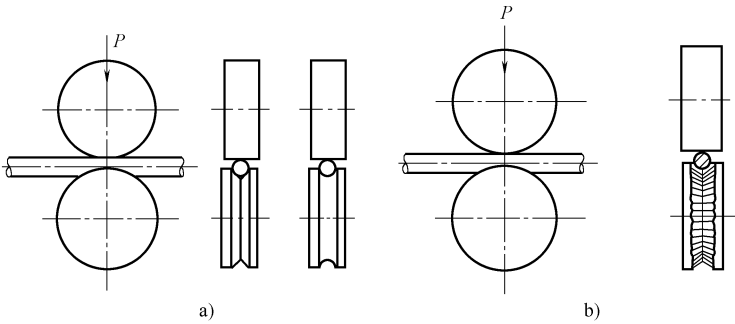


图 1-5-24 不同槽形的送丝轮
a) V 形、U 形 b) 滚花送丝轮

焊时,使用惰性气体导致焊枪的温度上升很快,应根据使用的电流大小和焊枪负载持续率选用合适规格的空冷或水冷焊枪。

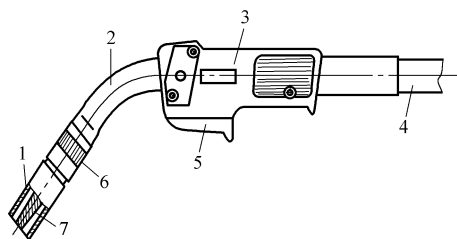


图 1-5-25 鹅颈式焊枪

1—喷嘴 2—鹅颈管 3—焊把 4—电缆
5—扳机开关 6—绝缘接头 7—导电嘴

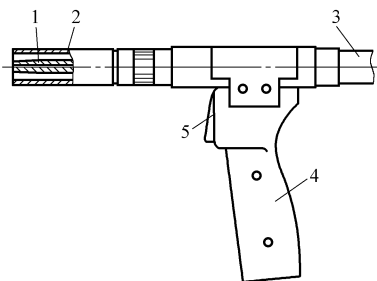


图 1-5-26 手枪式焊枪

1—导电嘴 2—喷嘴 3—电缆
4—焊把 5—扳机开关

半自动焊枪一般用于细丝,通常焊丝直径不超过 1.2mm,因电流不大常为空冷式,焊枪较轻,方便焊工的操作。自动焊枪用于细丝时多采用空冷式,而当焊接有色金属电流超过 120A 或粗丝大电流焊接时宜采用水冷式自动焊枪。除增加的冷却装置外,半自动焊枪结构与自动焊枪基本相同。为了方便夹持,自动焊枪常用直管式。

除了上述两种推丝式焊枪外,还有两种拉丝式焊枪。一种在焊枪上装有一小型送丝机;另外一种在焊枪上不仅装有送丝机,还装有小型焊丝盘,特别适合细焊丝和软焊丝的焊接。

(2) 导电嘴 导电嘴是焊枪中使用条件最恶劣的零件,属于易损件,导电嘴的形状如图 1-5-27 所示。导电嘴将电流传递给焊丝,因为焊丝具有一定的挠度,焊丝与导电嘴的接触点较紧,以满足导电的需要,如图 1-5-28 所示。

在焊丝连续输送的过程中,导电嘴会发生磨损。当磨损严重后,焊接过程中焊丝与导电嘴的接触点不稳定,易造成送丝不稳定或焊丝表面“打火”引起粘连,导致焊接中断。因此在焊接过程中,出现送丝不稳定、电弧时断时燃及焊丝在导电嘴处熔化焊在一起等问题时,可能是导电嘴不良所引起,应及时检查更换。

导电嘴内径一般比焊丝直径大 0.2mm,但还需根据焊丝直径来考虑:如焊丝直径 $\leq 1.6\text{mm}$,内径大 0.1~0.3mm;焊丝直径 $\leq 2\text{mm}$,内径大 0.4~0.6mm。导电嘴内径过大或过小均影响甚至严重影响送丝稳定性和焊接质量。铝合金和不锈钢焊丝焊接时,因受热膨胀,导电嘴内径应比同规格碳钢焊丝用导电嘴大约 0.2mm。为增强导电性,导电嘴用铜或铜合金制成,以 CuCrZr 合金为佳。这种合金硬度较高又耐高温,使用寿命长。

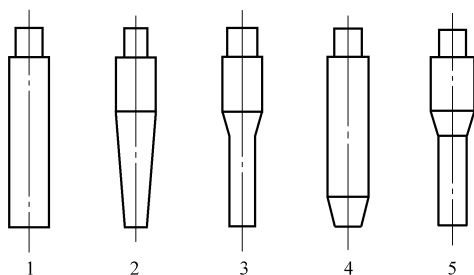


图 1-5-27 导电嘴的形状

1—柱形 2—锥台形 3—弧柱形 4—锥柱形 5—阶梯柱形

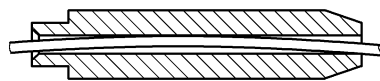


图 1-5-28 焊丝与导电嘴之间的电接触

(3) 喷嘴 喷嘴的作用是向焊接区输送保护气体, 其形状和尺寸对保护气体的状态、焊枪操作性能有直接影响, 应满足以下要求: 气体消耗量小, 保护作用充分; 气流要具有一定的速度和挺度; 应有绝缘材料与导电部分隔离; 结构简单, 易观察熔池。喷嘴形状如图 1-5-29 所示。圆柱形喷嘴的气体层流区较长, 保护效果较好, 较为常用。圆锥形喷嘴气体层流区较短, 但其气体挺度较大, 适合于坡口内或狭窄处场合。喷嘴的孔径根据所需保护气层大小、厚度、挺度来考虑。一般半自动焊喷嘴的孔径为 16~20mm, 自动焊必要时可适当用大些。在不影响操作的前提下, 可适当加长喷嘴增加气体层流区长度, 增强保护效果。

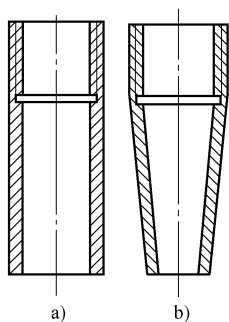


图 1-5-29 喷嘴形状

a) 圆柱形 b) 圆锥形

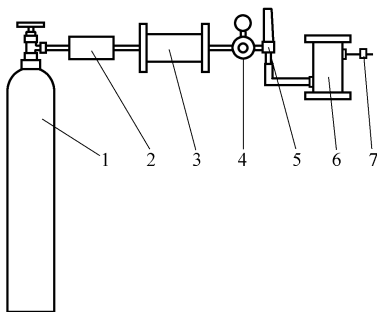


图 1-5-30 GMAW 供气系统示意图

1—气瓶 2—预热器 3—高压干燥器 4—气体减压阀
5—气体流量 6—低压干燥器 7—气阀

在焊接过程中, 焊接飞溅常粘到喷嘴内壁, 严重时影响保护效果, 甚至使喷嘴带电, 因此焊接过程中应经常清理喷嘴内壁飞溅。为减少清理次数, 采用的方法有两种: 一是在喷嘴内壁涂一层防飞溅剂, 这样喷嘴内壁不易粘连飞溅且清理也较为容易, 但使用不当易引起气孔及污染焊缝周围, 若焊后工件需要进行涂装, 将对涂料的附着力产生有害影响; 二是采用水冷喷嘴或厚壁喷嘴, 改善散热。

喷嘴常用铜制造, 也是易损件。当喷嘴损坏时, 可能会影响保护效果, 应及时更换。

3. 供气系统及冷却系统

供气系统主要由气瓶、减压阀、流量计、气管及气阀等组成, CO₂ 焊还需加装预热器和干燥器, MAG 焊有时还需加装气体配比器, 如图 1-5-30 所示。

采用水冷焊枪时需要冷却系统。冷却系统主要由水箱、水泵、冷却水管及水压开关组成。冷却水在冷却系统内循环, 可冷却软管内的铜导线、喷嘴及导电嘴。水压开关的作用是保证当水压太低或断水时, 保护焊枪不被烧坏。冷却系统可与弧焊电源合并在一起, 也可以与弧焊电源分离。

5.2.4 熔化极气体保护电弧焊的控制系统

GMAW 控制系统的主要功能有以下方面。

1) 控制焊机的起动与停止。

2) 控制提前送气与滞后停气。焊接起动时, 电磁气阀先接通, 保护气体输出一定时间后才引燃电弧; 焊接停止时, 电弧先熄灭, 延迟一定时间后才停止供气。这是为了保护引弧、熄弧处的焊缝不被氧化。

3) 控制引弧与熄弧。引弧方式一般有爆断引弧、慢送丝引弧及回抽引弧 3 种。爆断引弧主要用于细丝, 其过程是焊丝送进接触工件, 较大的短路电流使焊丝与工件接触处熔化并发生爆断, 从而引燃电弧。慢送丝引弧是指焊丝缓慢送进, 接触工件并引燃电弧后, 再提高送丝速度达到正常

值。回抽引弧主要用于粗丝自动焊,先用焊丝接触工件,通电后回抽焊丝引燃电弧。熄弧方式一般有焊丝返烧熄弧与电流衰减熄弧两种。焊丝返烧熄弧过程是先停止送丝,弧长逐渐增大,延迟一定时间后再切断电源熄弧。电流衰减熄弧过程是焊接电流及送丝速度同时衰减,防止焊丝与工件粘连,填满弧坑后再停止送丝并切断电源。

4) 控制水压开关动作,保证焊枪不被烧坏。

5) 控制送丝和小车移动。自动焊设备常将送丝机、焊枪调节机构及焊枪安装在小车上,随小车一起移动。控制小车移动就是控制小车开始移动、停止移动及焊接速度。

自动焊设备控制系统将弧焊电源、送丝系统、供气系统、冷却系统、行走系统与焊枪及焊枪调节系统组合在一起,形成全自动控制。只要按下起动开关,整个焊接过程就会按照既定的程序自动进行。

对先进的弧焊设备,整个控制系统还包括焊接参数自动调节系统,其作用是当因受到外界干扰焊接参数发生变化时,能够自动调节恢复到正常值,保证焊接过程的稳定。

5.2.5 熔化极气体保护电弧焊设备的选用原则

选择 GMAW 设备的一般原则如下。

1) 根据工件的材料与厚度、焊接位置等确定设备的输出功率范围、额定电流、电源的空载电压、电源的动特性、输出电流的类型、焊接参数的调节范围和送丝速度范围等。如在焊接低碳钢、低合金钢及不锈钢时,选用平特性直流弧焊电源及推丝式等速送丝机构即可。薄板焊接时一般选择输出功率低的弧焊电源,厚板焊接时常选用输出功率大的电源。粗丝大电流焊时,选用均匀送丝机构配以陡降或垂降弧焊电源,保证弧长的稳定。焊接铝合金薄板时,因焊丝细最好采用推拉式送丝机构等。

2) 按自动化程度和使用的焊接电流选用焊枪和负载持续率。半自动焊时一般选用鹅颈式焊枪或手枪式气冷焊枪,自动焊时常选用直管式焊枪,若电流大应考虑选用水冷式焊枪。选择焊枪时还应注意实际焊接电流应小于焊枪的额定电流,负载持续率应满足实际焊接需要。

3) 按产品的批量大小选用设备。批量大时,可考虑选用焊接专用机;批量小时,应尽量选用通用设备。产品规格品种多,而批量不大时,也可以考虑采用焊接机器人系统。

4) 根据施工特点考虑是否采用多功能设备。

5) 对产品质量有严格要求时,可采用数字化焊机便于应用软件进行联网监控。

6) 设备应满足现场使用条件,如水、电的供应条件。

此外,选用设备特别是购置新设备时还应考虑操作人员素质、采购成本及提高设备利用率等因素。

5.2.6 熔化极气体保护电弧焊焊机简介

GMAW 焊机按额定电流大小主要有 160A、200A、250A、350A、400A、500A、630A 及 1000A 等。额定电流较小的焊机如 NBC—160、NBC—200、NBC—250、NBC—350 等常用于细丝半自动焊,而额定电流较大的焊机如 NZ—1000 常用于粗丝自动焊。半自动焊时负载持续率多为 60% (CO_2)、35% (MAG),自动焊时负载持续率为 60%、100%。各种焊机的技术参数详见生产商的产品样本。

1. 晶闸管式 CO_2 /MAG 焊机的特点

晶闸管式 CO_2 /MAG 焊机控制性能好,其电流负反馈或电压负反馈可以保证焊接参数稳定,电压或电流的调节范围大,可以实现遥控。一般设有焊丝直径选择、实心/药芯焊丝切换和收弧选择功能以及一元化/个别调整转换功能。这种焊机因质量稳定所需维护较少,价格较低廉,目前仍是

国内使用量最大的焊机。

2. 逆变式 CO₂/MAG 焊机的特点

逆变式 CO₂/MAG 焊机具有重量轻、体积小及效率高的优点。目前逆变式 CO₂/MAG 焊机主要采用 IGBT 逆变技术，其中采用软开关的 IGBT 焊机节电性能更好。这类焊机一般采用电子控制或数字式控制技术，能自动补偿网络电压的波动，电弧稳定，焊缝成形美观，飞溅少。可以预设焊接电流与电弧电压并数显，方便精确调节。逆变式 CO₂/MAG 焊机适合于与机器人结合，组成自动焊接生产系统。

3. 数字式 CO₂/MAG 焊机的特点

数字式 CO₂/MAG 焊机通常采用 IGBT 式弧焊逆变器，其主电路及控制电路均采取了数字化的控制技术。为了解决 CO₂ 焊时飞溅大、焊缝成形差等问题，这类弧焊机通常采用了 DSP、模糊控制技术、自适应控制技术及波形控制技术等。通常内存有焊接专家数据库，可以预设焊接电压和送丝速度，具有焊接条件记忆功能。有的焊机送丝机搭载带编码器的数字电动机，实现高精度的送丝。数字式弧焊电源的功率损耗大大减少，效率达到 90% 以上。数字式弧焊机具有优良的动态响应特性，引弧性能好，飞溅小，甚至可以实现无飞溅焊接，焊缝成形得到显著改善。

4. 数字式脉冲 MIG/MAG 焊机的特点

数字式脉冲 MIG/MAG 焊机通常采用 IGBT 式弧焊逆变器，其主电路及控制电路均采取了数字化的控制技术。一般内置焊接专家系统，包括精细的焊接波形控制参数（如 STT 表面张力过渡控制技术 & 冷金属过渡 CMT，详见 5.5.1 节）、焊接过程参数及引弧收弧过程参数数据等，抗干扰能力强，焊接时送丝负荷变化或网路电压波动时，能保证稳定焊接。有的还采取双 CPU 控制、高速 CPLD 控制及数字送丝装置相融合的全数字控制技术，保证整体系统的高性能；通过编码器速度反馈控制（RSF）、四轮双驱送丝方式，实现高精度的焊丝送给。这类数字式弧焊机一般具有焊接条件的记忆功能，以在同一工位的多焊接参数时调用方便；配合自动焊专机或通过接口与计算机连接通信，实现焊接的实时网络监控。一些数字式弧焊机还可对软件修改和升级，柔性地对应个性化需求。数字式脉冲 MIG/MAG 焊机特别适合于铝合金及不锈钢的焊接。

5.3 熔化极气体保护电弧焊用气体及焊丝的选配

5.3.1 保护气体的作用与特性

1. 保护气体的作用

GMAW 使用的保护气体主要有氩气、二氧化碳、氦气、氧气、氮气及氢气。它们的特性见表 1-5-6。

表 1-5-6 保护气体的特性

气体名称	化学符号	密度/(kg/m ³)	与空气密度的比值	反应特性
氩气	Ar	1.784	1.38	惰性气体
氦气	He	0.178	0.138	惰性气体
二氧化碳	CO ₂	1.977	1.529	氧化性气体
氧气	O ₂	1.429	1.105	氧化性气体
氮气	N ₂	1.251	0.968	不活泼气体
氢气	H ₂	0.090	0.070	还原性气体

根据焊接工艺的需要，保护气体可以是单一气体，也可以是几种气体按一定比例配制的混合气体。保护气体在焊接过程中的主要作用有以下方面。

(1) 将焊接区与空气隔开 保护焊接区不受空气的影响。由于氧和氮均可溶解在液态金属中,与液态金属发生反应会形成氧化物和氮化物,焊缝凝固后残留在焊缝金属中,对焊接接头的性能产生有害影响,所以保护气体应对焊接区域,包括电弧、熔池、熔滴及热影响区进行良好的保护。另外,保护气体能有效地控制冶金反应,防止气孔、夹渣及裂纹等缺陷产生,并保证焊缝力学性能。

(2) 改善焊接工艺性能 主要包括提高电弧的稳定性、改善焊缝成形、改变熔深、降低焊接飞溅、提高熔敷效率及改善引弧性能等。

2. 氩气的特性

空气中含有少量的氩气,通常从空气分离获得氩气。氩气是一种无色无味的惰性气体,其密度约为空气密度的 1.4 倍,比空气重。因此在平焊位置,氩气对焊接区的保护作用最好,受空气流动的影响小。氩气能较好地控制立焊及仰焊时的熔池,但保护效果比平焊略差。

因氩气电离电位低,在焊接电弧中很容易电离,电弧易引燃且引燃后非常稳定,因此其电弧电压也较低,如图 1-5-31 所示。由于电弧能量相对较低,对工件的热输入较低,氩气特别适合薄板的焊接。

氩气是单原子气体,高温时不分解、不吸热以及热导率小,在氩气中燃烧的电弧热量损失小,弧柱等离子体具有弧柱中心能量高而周围能量低的特点。这一特点决定了氩弧焊焊缝中心熔深呈深而窄的“指状”,而两侧熔深较浅,如图 1-5-32 所示。但因氩弧热输入低,出现这种指状熔深时,易产生气孔及未熔合缺陷。

采用纯氩作为保护气体时,短路过渡、粗滴过渡及喷射过渡均比较容易实现。

由于氩的相对原子质量大,直流反接时,质量大的氩离子会对工件表面产生强烈的轰击,能够破碎和去除铝、镁及其合金表面的氧化膜,有一定的阴极清理作用。

氩气几乎可用于所有金属的焊接,但在焊接碳钢、低合金钢及不锈钢时,若用纯氩保护,会出现电弧不稳定和熔滴过渡不良的问题,需要加入一定量的氧化性气体,如 O_2 、 CO_2 。从制造成本考虑,焊接铝、钛、铜等有色金属及其合金时,使用纯氩有利,而一般焊接低碳钢则不经济。

3. 氦气的特性

氦气一般从天然气中萃取后再提纯获得,存储要求高且制造过程复杂,所以价格较贵。也可从空气中分离获得氦气,但空气中氦气含量非常少。

氦气也是一种惰性气体,其密度比空气小,约为空气密度的 0.14 倍,见表 1-5-6。因氦气密度小,所以在平焊时,保护效果没氩气好,对空气的流动比较敏感。若要得到相同的保护效果,平焊时氦气的流量需提高为氩气的 2~3 倍;但立焊和仰焊时,氦气的保护效果好。

氦气的电离电位比氩气高,在给定的弧长和焊接电流下,氦弧的电弧电压比氩弧高很多,如图 1-5-31 所示。氦气保护时电弧能量相对较高,对工件的热输入较高,适合焊接较厚的工件及高热导率的金属。

氦气的热导率高,其弧柱能量分布比氩弧等离子体均匀。因此氦气保护焊时,焊缝形状特点为熔深与熔宽较大,如图 1-5-32 所示。氦气保护焊时,不易产生热裂纹与气孔,焊后余高低,不易产生咬边。

氦气可以用来焊接所有金属。但采用纯氦气作为保护气体时,在任何焊接电流时都不能实现轴向喷射过渡,而且常产生较多的飞溅,同时焊缝表面粗糙。考虑到这些问题而且氦气价格高,在实际生产中,一般不采用纯氦,而是常利用其优点,采用氩氦混合气体来焊接高热导率的铝、铜及其合金。

4. 二氧化碳的特性

CO_2 气体一般是化工、食品工业的副产品,价格比较便宜。 CO_2 气体的密度比空气大,约为空气密度的 1.5 倍,见表 1-5-6。 CO_2 有固态、液态和气态三种状态。 CO_2 的沸点为 $-78^\circ C$,所以常

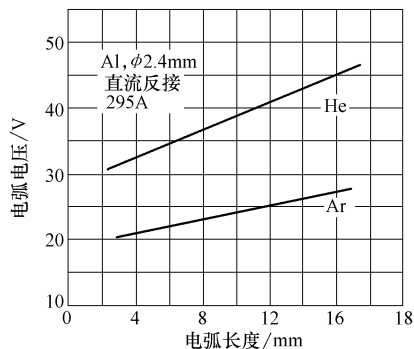


图 1-5-31 Ar 和 He 的电弧电压特性

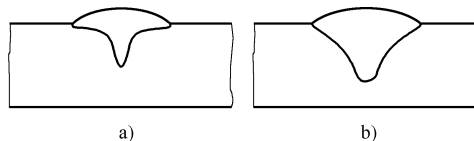


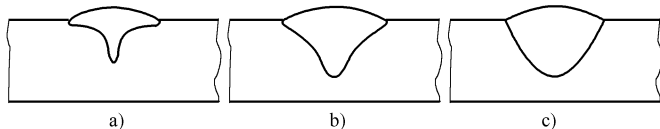
图 1-5-32 MIG 焊时保护气体对熔深的影响

a) 保护气体为 Ar b) 保护气体为 Ar25% + He75% (体积分数)

温就可汽化。通常容积为 40L 的标准钢瓶可以灌入 25kg 的液态 CO_2 ，约占气瓶体积的 80%，其余 20% 为汽化的 CO_2 ，气瓶压力表上所指示的压力值是这部分气体的饱和压力。只要气瓶中还有液态 CO_2 ，这个饱和压力基本不变。由于液态 CO_2 中可溶解质量分数为 0.05% 的水，多余的水则成自由状态沉于瓶底。当液态 CO_2 全部变成气体后，瓶内的压力便会随着气体的消耗而降低，瓶内水分的汽化量也随之增多。当瓶内压力低于 1.0MPa 时，瓶内的气体不宜继续使用，否则易产生气孔。

CO_2 是唯一能作为保护气体单独用于焊接的氧化性气体。室温下， CO_2 气体不与金属发生反应。但在电弧高温下， CO_2 电弧的强烈氧化性将烧损铁及合金元素。

CO_2 焊时， CO_2 在电弧高温下发生分解，电弧电压比较高， CO_2 的热导率很高。这些因素导致 CO_2 焊的焊缝具有较大熔宽的特点，不会出现氩弧焊时形成的指状熔深，如图 1-5-33 所示。

图 1-5-33 CO_2 气体对焊缝熔宽与熔深的影响a) 保护气体为 Ar b) 保护气体为 Ar82% + CO_2 18%
(体积分数) c) 保护气体为 CO_2

与惰性气体相比，采用纯 CO_2 作为保护气体时，飞溅较多。但因

其价格便宜，主要用于碳钢及低合金钢的焊接。 CO_2 焊一般采用短路过渡，因熔池小且凝固速度快，常用于薄板焊接及全位置焊接；此外在较大电流及较高电弧电压条件下， CO_2 焊能够以喷射过渡形式焊接中厚板，但只能焊接水平位置的焊缝。

由于电弧具有强烈的氧化性， CO_2 焊需要与专门加入较多脱氧元素的焊丝相配，才能保证焊缝金属的力学性能。

5. 氧气的特性

空气中含有较多的氧气，体积分数占 21% 左右。同氩气一样，通常从空气分离获得氧气。

氧气不能作为保护气体单独使用，但为了稳定电弧，可以在惰性气体中添加少量氧气，一般体积分数不超过 10%。氧气可以降低电弧中熔滴与熔池的表面张力，使熔池金属流动性增强，可改善焊缝表面成形，但过强的流动性对全位置焊是不利的。

与 CO_2 气体一样，焊接过程中氧气可与金属形成氧化物，从而烧损一些合金元素。这些氧化产物一部分形成了焊渣，少量的氧化物可能残留在焊缝中，损害焊缝的力学性能。

6. 氮气的特性

空气中含有大量的氮气，体积分数占 78% 左右。同氩气、氧气一样，通常从空气分离获得氮气。

室温时，氮气是一种惰性气体。但在电弧高温作用下，氮气发生分解，能够与熔池金属发生反应并溶解在焊缝中。这种情况对焊接铁素体-奥氏体双相不锈钢有利，这是因为氮是这种不锈钢的合金元素之一，在保护气体中添加少量氮气可以弥补焊接过程中烧损的氮。同样，由于氮是奥氏体形成元素，焊接奥氏体不锈钢时，也可添加少量氮气。一般氮气的添加量不超过 5%（体积分数），若含量过高，焊缝中易产生氮气孔。氮气有提高热输入及增加熔深的作用。

氮气不能用于碳素钢的焊接，这是因为焊接过程中形成的氮化物会恶化焊缝的力学性能。因为氮不会与铜发生冶金反应，所以纯氮气可以作为焊接铜时的保护气体，也可以在惰性气体中加入氮气用于铜及铜合金的焊接。

7. 氢气的特性

氢气通常通过电解水获得。氢只能与其他惰性气体混合才能用于焊接，可用于奥氏体不锈钢、镍及镍合金的焊接。含氢混合气体能提高热输入，提高焊接速度，降低发尘量。氢可还原氧化物，防止焊缝表面被氧化。不锈钢 MIG 焊时，常在氩气中加入少量氢气，可减轻焊缝表面被氧化的程度。氢气含量过高时，焊缝易产生氢气孔。氢是可燃气体，混合气体中氢含量不宜超过 5%（体积分数）。

含氢的混合气体不能用于焊接碳钢，因为会引起氢脆，使焊缝韧性恶化。

5.3.2 保护气体的标准及其选用

1. 保护气体的标准

保护气体的标准有：GB 4842—2006《氩》；GB 4844—2001《纯氮、高纯氮和超纯氮》；HG/T 2537—1993《焊接用二氧化碳》；GB/T 3863—2008《工业氧》；GB/T 3864—2008《工业氮》；GB/T 3634.1—2006《工业氢》。

我国对焊接用混合气体没有标准规定，混合比例、允差大小、检验方法等技术要求由供需双方商定，具体可参考 EN439《焊接材料—电弧焊和切割用保护气体》及 AWS A5.32/A5.32M《焊接保护气体规范》。

2. 保护气体的选用

（1）铝及铝合金 对于板厚不超过 25mm 的工件焊接时，常用的保护气体是氩气。氩弧焊电弧很稳定，飞溅极小。但由于铝的热导率比较高，焊接较厚工件时，焊接速度不宜过大，否则焊缝成形变差。厚板焊接时，可在保护气体中添加氮，提高电弧的热输入，增加熔深，改善焊缝成形，提高焊接速度，同时气孔率也降低。对于厚 25 ~ 76mm 的工件焊接时，一般选用 Ar35% + He65%（体积分数）；工件厚度超过 76mm 时，一般选用 Ar25% + He75%（体积分数）。

铝及铝合金焊接不宜使用添加活性气体的保护气体，这是因为焊缝中易产生氧化物夹渣且焊缝表面易氧化。氢在熔池中溶解度较大，焊缝凝固时，在很窄的温度区间氢的溶解度从 0.69mL/100g 急剧下降至 0.036mL/100g，大量的氢难以从熔池中逸出，从而在焊缝中产生大量氢气孔。铝及铝合金的焊接也不宜使用添加氢的混合气体。为保证焊缝的致密性，铝合金 MIG 焊时宜采用高纯氩。

（2）钛 宜使用氩气或氩气与氮气的混合气体，电弧稳定性好。氮和氧对钛焊缝的力学性能有害，不宜使用含氮、氧的保护气体；在焊缝背面应同时采用惰性气体保护，防止氮、氧对焊缝污染。

(3) 铜及铜合金 采用氩气作为保护气体时,能产生稳定的过渡及良好的润湿性。因铜的热导率较大,焊接厚板时,通常在氩气中加入体积分数为 50% ~ 70% 的氮气,增加热输入,降低预热温度,增加熔深并改善焊缝成形。此外,氮与铜不发生冶金反应,铜及铜合金焊接时可以在保护气体中添加氮气。

(4) 镍及镍合金 薄板焊接时采用纯氩气体保护,能得到稳定的短路过渡、喷射过渡。焊接厚板时,可在氩气中加入体积分数为 10% ~ 20% 的氮气作为保护气体,提高电弧的热输入。添加活性气体会使焊缝表面发生氧化,恶化焊缝成形,但可以在氩气中添加氢气来提高热输入,焊缝也不易氧化。

(5) 不锈钢 采用纯氩保护时,电弧不稳定,焊道成形不良且形成指状熔深。通常在保护气体中添加少量活性气体来提高电弧稳定性,如加入体积分数为 1% ~ 2% 的氧气或体积分数为 1% ~ 5% 的 CO_2 气体。采用氩气加入体积分数为 1% ~ 2% 的氧气作为保护气体时,除改善电弧稳定性外,还能得到稳定的喷射过渡,提高熔池流动性,焊缝成形良好且不易产生咬边。

焊缝增碳会提高低碳奥氏体不锈钢的晶间腐蚀倾向,因此焊接低碳奥氏体不锈钢时,保护气体中不宜添加 CO_2 。在氩气中添加少量氢气,可以增加熔宽,提高焊接速度。在保护气体中添加体积分数为 1% ~ 2% 的氢气,可以减少氧化物或防止氧化物的形成,减轻焊缝表面氧化程度,提高焊缝表面清洁度。焊接铁素体-奥氏体双相不锈钢时,保护气体中可以添加少量氮气。

(6) 低碳钢及低合金钢 若对焊缝成形、冲击韧度要求不高,可以选用价廉的纯 CO_2 保护气体,否则应选择富氩混合气体。

在氩气中加入体积分数为 20% ~ 30% 的 CO_2 气体后,电弧燃烧稳定,飞溅小且焊缝成形美观。 $\text{Ar } 80\% + \text{CO}_2 20\%$ (体积分数)是低碳钢与低合金钢常用的保护气体。当 CO_2 气体加入的体积分数超过 30% 后,熔滴过渡失去氩弧特征而呈现 CO_2 电弧的特征,电弧稳定性变差,飞溅增大。

氩气中加入体积分数为 1% ~ 9% 的氧气改善了电弧的稳定性,适用于喷射过渡,焊缝成形好且不易产生咬边,飞溅小并可提高焊接速度。

与只添加少量 CO_2 气体的二元保护气体相比,在氩气中同时加入 CO_2 气体与氧气组成三元保护气体,焊接低碳钢及低合金钢时工艺效果更理想。常用的三元保护气体为 $\text{Ar } 80\% + \text{CO}_2 15\% + \text{O}_2 5\%$ (体积分数),适宜喷射过渡,焊缝成形好且熔深较大。

采用四元保护气体 $\text{Ar } 65\% + \text{He } 26.5\% + \text{CO}_2 8\% + \text{O}_2 0.5\%$ (体积分数)焊接(即 TIME 焊,详见 5.7.1 节)时,能够提高电弧电压,提高喷射过渡临界电流值,能在大电流下得到稳定的熔滴过渡,实现高速和高熔敷率的焊接,而不会产生“驼峰”焊缝和咬边现象,焊缝平滑美观,余高小,飞溅很小,且焊缝力学性能好。从经济性考虑,这种四元混合气体适用于低合金高强度钢的高速焊接。

5.3.3 工厂供气及流量控制方法

工厂供气一般有钢瓶供气、汇流排供气及气站式集中供气三种方式。

1. 钢瓶供气

CO_2 焊供气示意图如图 1-5-30 所示。供气系统由气瓶、预热器、减压阀、干燥器、流量计、气管及气阀等组成。

CO_2 气瓶为铝白色并注明“液体二氧化碳”黑色字样。预热器的作用是防止因气瓶中液态 CO_2 快速汽化吸热,在钢瓶出口处或减压阀中水分结霜而堵塞气路。减压阀的作用是调节气体的流量与压力。如果气体中水含量不能满足焊接需要,可在气路中串接干燥器进一步去除水分。常用的干燥剂是硅胶、无水硫酸铜等,使用一段时间因干燥剂吸水达到饱和而失效,可以对干燥剂进行烘干重复使用。气阀的作用是适时地通气与断气,即提前通气及滞后断气,使焊接区域始终得到

良好的保护，常用气阀为电磁阀。

如果发现 CO_2 气体水分含量高，可先将气瓶倒立静置 1~2h，使水分沉积在底部，然后打开气阀放水 2~3 次，每次放水间隔时间约为 30min。最后将气瓶放正，在使用前先放气 2~3min，去除上部气体所含的空气与水分。

焊接质量与保护气体流量大小有关，过大过小的流量均会出现保护不良。为控制保护气体的流量，通常在气阀前加装浮子式流量计，其规格为 25L/min。在使用大电流大流量保护气进行厚板自动焊或采用抗风式焊枪时，应配用规格为 50L/min 的流量计且应选用孔径 2.0mm 的气阀。

MIG 焊及采用瓶装混合气体 MAG 焊供气系统中不需要预热器和干燥器，其他与 CO_2 焊相同。若现场混合气体，则 MAG 焊供气系统中还应增加气体配比器。将需要混合的气体分别接入气体配比器，通过调节配比器旋钮就可方便地得到所需要的混合气体。

2. 汇流排供气

气体汇流排是将多个气瓶集合起来，通过夹具及软管输入至汇流排主管道，汇流排示例如图 1-5-34 所示。汇流排是使气体经减压、调节，通过管道输送至使用现场，实现集中供气的装置，适用于气体消耗量较大的企业。使用汇流排可以减少换钢瓶的次数，减轻工人的劳动强度和节约人工成本，减少安全隐患。

汇流排分双侧式、单侧式及半自动切换与全自动切换式等几种类型。

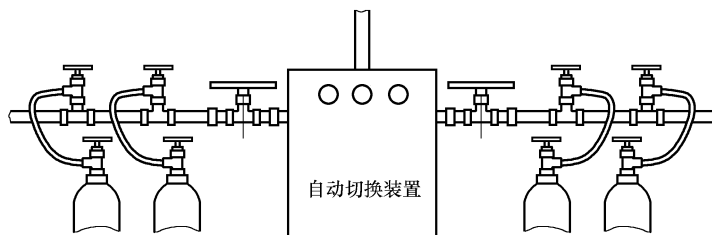


图 1-5-34 汇流排

双侧式气体汇流排采用主供气瓶组和备用气瓶组双气源结构，在主供气瓶组的压力降低至无法供气时，关闭主供气瓶组阀门，同时打开备用气瓶组开始供气。该类型的汇流排通过人工操作实现主供气源与备用气源之间的切换。切换过程存在停止供气现象。单侧式气体汇流排与双侧式气体汇流排的主要区别在于只有单一气源，气体消耗完后要重新换瓶后才能继续供气。

半自动切换气体汇流排专为提供不间断供气的要求而设计。这种形式的汇流排采用主供气瓶组和备用气瓶组双气源结构，由于在主供气瓶组与备用气瓶组减压器的压力设定方面有差别，当主供气瓶组的压力降至设定压力时，系统开始自动切换，由备用气瓶组开始供气，从而实现不间断供气功能，为实现下一次的自动切换。在空瓶进行调换后，必须对两个气瓶组的气体减压器重新进行设定，这种形式的汇流排通过主管线的减压器二级减压实现输出压力稳定。全自动切换气体汇流排专为两路气源之间的自动切换而设计，该系列气体汇流排不需操作者任何调试即可实现自动切换，即使在电气系统断电状态下仍可正常工作。

3. 气站式集中供气系统

气站式集中供气系统是指工厂采用专用气体储罐代替气瓶，气体供应商用专用槽车将焊接气体充入储罐内，储罐内的气体经汽化减压后送进车间焊接气体管网，供生产使用。这种供气方法适用于保护气体消耗量很大的工厂。

气站式混合气体集中供气系统示例如图 1-5-35 所示。 CO_2 气体及氩气首先分别从储罐进入汽化器汽化，经减压器减压后接入气体配比器，从气体配比器出来的混合气体进行减压后就直到输入

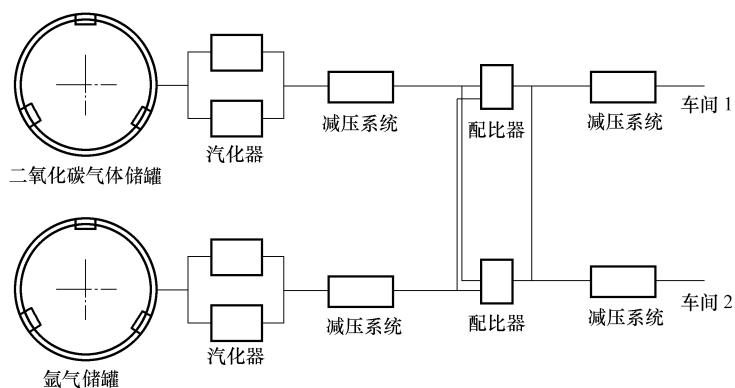


图 1-5-35 气站式混合气体集中供气系统

到车间气体管网。

一般气体配比器出口压力为 $0.2 \sim 0.4 \text{ MPa}$ ，经减压后输送到车间管网压力为 $0.02 \sim 0.03 \text{ MPa}$ ，各焊接台位可直接使用，不需装流量计，只需控制气源的压力和流量维持车间管网的压力在 $0.02 \sim 0.03 \text{ MPa}$ 之间。这种车间管网低压供气的方式，有可能引起瞬时流量不足的问题。为解决这一问题，车间气体主管道管径一般较大，管路设计为环路，且对焊机集中的台位增加小气罐。如果混合气体从气体配比器出来后不再减压，则车间管道压力较高，一般在 $0.2 \sim 0.4 \text{ MPa}$ 之间，不能直接使用，需要在使用前加装气体流量计控制流量。

综合来看，车间管网低压供气因不用气瓶、漏气少、不需要使用气体流量计及不间断供气等优点，综合成本低。

5.3.4 焊丝分类及其性能对焊接工艺性能的影响

1. 焊丝分类

GMAW 用焊丝分为实心焊丝及药芯焊丝两类。本节只叙述实心焊丝，药芯焊丝内容参见本章 5.6 节。

实心焊丝按材质不同可分为碳钢焊丝、低合金钢焊丝、不锈钢焊丝、铝及铝合金焊丝、铜及铜合金焊丝、镍及镍合金焊丝等。

2. 焊丝性能对焊接工艺性能影响

焊丝性能分为内在质量与外在质量两个部分。内在质量主要是指焊丝的化学成分及力学性能，包括熔敷金属力学性能。外在质量主要是指焊丝表面质量、焊丝松弛直径与翘距等。

(1) 焊丝化学成分的影响 CO_2 焊时，为防止产生 CO 气孔，在焊丝中加入了较多的脱氧元素 Si 、 Mn ；同时为加强脱氧及抑制氮气孔产生还加入了 Ti 、 Al 等先期脱氧元素。焊丝中碳含量对气孔及飞溅的影响很大，因此限制焊丝中碳的质量分数不超过 0.15% 。焊丝中合金元素含量适当时，如提高焊丝中硅含量，可以降低熔融金属的粘度，提高熔池流动性，从而得到边缘整齐的焊缝，但过高的硅含量将影响焊缝金属的韧性。

(2) 焊丝硬度的影响 在很多焊接场合，焊接过程中焊丝的送丝阻力是发生变化的。过软的焊丝在送丝阻力增大时会引起送丝不稳定，从而影响电弧的稳定性。对碳钢及低合金钢焊丝，一般通过控制焊丝的抗拉强度来保证焊丝具有合适的硬度。铝焊丝较软，无法通过提高抗拉强度来克服送丝阻力对送丝稳定性的影响，通常选择非金属送丝软管。

(3) 焊丝表面质量的影响 碳钢焊丝表面通常采用镀铜的方法来提高导电性、减少送丝阻力及提高防锈能力。但镀铜焊丝存在镀铜层脱落的问题，当镀层附着力不强或表面起鳞时，这一问题

更严重。脱落的铜屑会沉积在送丝软管内,增大送丝阻力影响电弧稳定性。近年开发的一种非镀铜焊丝,在焊丝的表面涂有一层特殊的物质来减少送丝阻力并防锈,克服了镀铜层脱落对送丝性能的影响。

铝焊丝的表面必须被加工得很光滑,配合聚四氟乙烯或尼龙材料制成的送丝软管才能保证送丝稳定性。不锈钢焊丝表面如果无光泽且表面较粗糙时,将增大送丝阻力,同时在送丝软管内产生小颗粒沉积进一步增加送丝阻力。

此外,焊丝表面生锈、存在油与水等污染时,均会对送丝产生影响并增加气孔敏感性。

(4) 焊丝松弛直径及翘距的影响 从焊丝盘上截取足够长的焊丝,不受拘束地放在地面上,测量所形成的圆或圆弧直径即为松弛直径。焊丝翘起的最高点到平面的距离即为翘距。焊丝松弛直径与翘距是在生产过程中产生的,与生产工艺及层绕方法有关,但它们对焊丝的导电性有很大影响。松弛直径过小或过大及翘距过大时,会引起焊丝与导电嘴接触点位置及接触电阻发生变化,焊丝端会发生跳动,电弧旋转,焊接电流不稳定。

(5) 焊丝导电性和导热性的影响 铝的导热性好,引弧时熔融金属未铺开就可能凝固,因此可能产生熔合不良、余高过大及气孔等缺陷,不易得到光滑的焊缝表面成形,往往需要增大热输入来改善。同时因为熔池颜色与工件基本没有区别,不易观察及发现烧穿与过热问题。

铜的导电性和导热性均非常好,通常需要预热及增加热输入来改善润湿性及焊缝成形。

不锈钢的导电性和导热性能都不好,平焊时焊缝成形好,但立焊及仰焊时熔融金属易下淌恶化焊缝成形,因此需要减少热输入或者采用脉冲电流。

5.3.5 焊丝的标准及其选用

本节只介绍 GMAW 用实心焊丝的知识,有关药芯焊丝内容见 5.6 节。

1. 焊丝标准

GMAW 用焊丝标准主要有:GB/T 8110—2008《气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝》;YB/T 5092—2005《焊接用不锈钢丝》;GB/T 10858—2008《铝及铝合金焊丝》;GB/T 9460—2008《铜及铜合金焊丝》;GB/T 15620—2008《镍及镍合金焊丝》。

2. 焊丝的选用

焊丝选用考虑的因素很多,通常有母材化学成分、熔敷金属力学性能、耐热性耐蚀性、工件厚度、坡口形状、保护气体、焊接位置、焊后热处理及焊接成本等。

(1) 碳钢及低合金钢焊丝 碳钢及低合金钢焊丝一般按熔敷金属与母材等强等韧的原则选用或按行业规范的要求选用。

1) 碳钢焊丝主要有 ER50-2、ER50-3、ER50-4、ER50-6、ER50-7、ER49-1 共 6 个型号。通常这些焊丝既可以配用 CO_2 气体,也可以配用混合气体。保护气体氧化性强时,选用高 Mn 高 Si 焊丝;反之选用低 Mn 低 Si 焊丝。这 6 种焊丝强度级别基本一致,但对熔敷金属冲击韧度的要求有所不同。ER50-2、ER50-6 及 ER50-7 要求 -30°C 冲击吸收能量不小于 27J,ER50-3 要求 -20°C 冲击吸收能量不小于 27J,ER49-1 要求室温冲击吸收能量不小于 47J,ER50-4 则对冲击吸收能量不要求。

2) 碳钼钢焊丝只有 ER49-A1 一种。铬钼钢焊丝有 ER55-B2、ER49-B2L、ER55-B2-MnV、ER55-B2-Mn、ER62-B3、ER55-B3L、ER55-B6、ER55-B8、ER62-B9 共 9 种。选用时主要考虑熔敷金属合金元素含量应与母材相同或略高于母材,保证抗高温性能的要求。

3) 镍钢焊丝有 ER55-Ni1、ER55-Ni2、ER55-Ni3 共 3 种,分别适用于 -45°C 、 -60°C 、 -75°C 低温条件下镍钢(即低温钢)的焊接。

4) 锰钼钢的焊丝有 ER55-D2、ER62-D2、ER55-D2-Ti 共 3 种,其中前两种焊丝成分相同,但

ER62-D2 使用的保护气体为 $\text{Ar} + \text{O}_2$ (1% ~ 5%) (体积分数), ER55-D2 使用 CO_2 。

5) ER55-1 是耐候钢专用焊丝, 主要用于铁道车辆用钢 Q450NQR1 的焊接。

6) ER69-1、ER76-1、ER83-1 分别适用于 690MPa、760MPa、830MPa 级低合金高强度钢的焊接。

(2) 不锈钢焊丝 不锈钢焊丝选用的主要原则是保证焊缝合金含量与母材基本一致。因此每种焊丝通常焊接同牌号的不锈钢。但需要注意的是, 因焊接过程烧损, 焊丝合金元素一般略高于母材, 但碳含量低于母材以保证耐蚀性的要求。

1) 奥氏体不锈钢焊丝 (H08Cr21Ni10、H03Cr21Ni10、H12Cr24Ni13、H12Cr26Ni21 等) 主要用于同牌号不锈钢的焊接。若不需要焊接接头性能与母材相当或不需要预热及焊后热处理, 也可用于铁素体不锈钢及马氏体不锈钢的焊接。

2) 铁素体不锈钢焊丝 (H06Cr14、H10Cr17、H01Cr26Mo 等) 主要用于同牌号不锈钢的焊接, 超纯铁素体焊丝 (如 H01Cr26Mo) 应使用惰性气体保护, 防止氧、氮污染焊缝。

3) 马氏体不锈钢焊丝 (H12Cr13、H06Cr12Ni4Mo 等) 除用于焊接同类型不锈钢外, 可用于堆焊。

4) 奥氏体 + 铁素体型双相不锈钢焊丝 (H03Cr22Ni8Mo3N、H03Cr25Ni5Mo3Cu2N 等) 除用于同牌号双相不锈钢焊接外, 也可用于不同种类及低碳钢与不锈钢的焊接, 此外还可作为堆焊材料使用。

5) 沉淀硬化型不锈钢焊丝 (H05Cr17Ni4Cu4Nb) 用于焊接 07Cr17Ni4Cu4Nb 或其他沉淀硬化型不锈钢。

6) 超低碳不锈钢应选用同牌号的超低碳不锈钢焊丝来焊接。

(3) 铝及铝合金焊丝 铝及铝合金 GMAW 焊时, 选用与母材成分相近或相同牌号的焊丝, 可以获得较好的耐蚀性。但一些情况下还应从对焊接接头强度、塑性、耐蚀性、抗裂纹及外观颜色等方面的要求综合考虑来选用焊丝, 焊缝的成分可能与母材不一致。如焊接热裂纹倾向大的热处理强化铝合金时, 则主要从解决抗裂性出发选择焊丝, 这时焊丝的成分就可与母材的差别很大。

1) 对纯铝一般根据纯度选用同型号的纯铝焊丝 (SAI1100、SAI1070、SAI1450、SAI1200 等) 或纯度高的焊丝。当要求较高的强度和最低的裂纹倾向时宜选用 SAI4043 型铝硅焊丝。

2) 铝铜焊丝 (SAI2319) 一般用于铝铜合金的焊接。铝锰焊丝 (SAI3103) 一般用于铝锰合金的焊接, 也可以使用铝硅焊丝焊接铝锰合金。

3) 铝硅焊丝 (SAI4043、SAI4047 等) 因具有良好的抗裂性, 可以焊接纯铝及各种铝合金, 其中 SAI4043 使用最广。

4) 铝镁焊丝 (SAI5356、SAI5554、SAI5654、SAI5183、SAI5556 等) 分别适用于焊接含镁量相同的铝镁合金、铝镁硅合金及铝镁锌合金。含镁量增加时裂纹敏感性下降, 因此选用含镁较高的焊丝可以提高抗裂性。SAI5356 是通用性大的一种焊丝, 经阳极处理配色也理想。

(4) 异种金属焊接时焊丝的选用 异种金属焊接时, 焊丝的选用原则是: 焊缝熔敷金属必须满足接头设计需要的性能, 如力学性能、耐蚀性等。此外还应考虑坡口形式、操作技术对熔敷金属稀释量的影响, 以及熔敷金属是否有足够的塑性, 而不会因稀释产生裂纹或降低接头的力学性能。

5.4 熔化极气体保护电弧焊工艺的特点及应用

5.4.1 焊前准备

焊前准备主要包括接头和坡口设计、坡口加工、接头清理、焊接装配、工装调整及弧焊设备选择等。

1. 坡口设计与加工

焊接接头开坡口的目的是为保证接头根部焊透,或调节焊缝金属的熔合比,或改善焊缝成形。坡口设计可参考 GB/T 985.1—2008《气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口》、GB/T 985.3—2008《铝及铝合金气体保护焊的推荐坡口》及 DIN 8552—3—2006《焊缝准备 铜及铜合金坡口形状 第3部分:气体熔焊和气体保护焊》。坡口加工方法有机械加工、火焰或等离子弧切割等方法,坡口加工质量应符合相关标准及焊接工艺的要求。

2. 接头清理

为防止产生气孔,应对焊接坡口及其两侧 20mm 范围内的氧化膜、油污及其他脏物进行清理。

对钢材、铜及铜合金接头,可采用砂布、角向磨光机及不锈钢钢丝刷等机械方法进行清理直至露出金属光泽为止;也可采用酸洗的化学方法清理。清理好的焊件与焊丝应在 24h 内焊接,否则应重新清理。

对铝及铝合金接头,先用洁净的布蘸丙酮或四氯化碳等有机溶剂擦拭清除油污,然后采用锉削、刮削、铣削或直径为 0.2mm 左右的不锈钢钢丝刷清理氧化膜。也可以采用化学方法清理氧化膜,如用约 70℃ 5% ~ 10% 的 NaOH 溶液浸泡 0.5 ~ 1min,水洗后用 15% 的 HNO₃ 在常温下浸泡 1 ~ 3min 中和光化,然后用温水清洗直至干燥。必要时应对焊丝采用相同方法,清除油污然后再用相同的化学方法除去氧化膜。酸洗时间不宜过长,否则工件表面将变黑。清洗好的工件表面应呈现无光泽的银白色。清理好的工件与焊丝应在 8h 内焊接,否则应重新清理。

3. 焊接装配

装配的目的是为了控制零件间的几何及尺寸精度,并维持坡口尺寸及防止焊接变形。装配质量对焊接质量影响很大,一般采用工装及定位焊来控制装配质量。复杂的构件可采用合理的装焊顺序来控制焊接应力与变形。

4. 工装调整及焊接设备的选择

工装调整的目的是为了保证装配质量符合设计要求。焊接设备的选择主要是根据工件材料、工件厚度、焊接参数(如焊接电流、焊丝直径等)的要求确定合适的焊机及送丝机、焊枪等,详见 5.2.5 节。焊接前一般应清理喷嘴飞溅,检查送丝轮压力是否正常、送丝软管是否通畅及导电嘴接触是否良好等。

5.4.2 焊接参数及其设定

GMAW 的焊接参数主要有焊丝直径、送丝速度、焊接电流、电弧电压、焊接速度、气体流量、焊丝伸出长度、电源极性、焊枪角度及焊接方向等。

焊接参数的设定,一般应从质量、成本及生产效率等方面综合考虑。在对质量要求不高的场合,如对焊缝内在质量要求低,没有量化指标要求时,可以仅以焊缝外观质量状况为依据来确定焊接参数。而当对焊缝外观质量与内在质量都有较高要求时,一般根据经验先拟定焊接参数,再经焊接工艺评定进行验证性试验,验证拟定的焊接参数是否满足设计确定的焊缝外观质量与内在质量的要求。若试验的指标全部符合技术要求,则证明拟定的焊接工艺是可行的,可根据焊接工艺评定报告编制正式的焊接工艺指导实际产品的焊接。若试验的指标中有不合格项,需作相应修改或重新拟定焊接参数,再作焊接工艺评定试验,直至全部指标合格。

在锅炉、压力容器、造船、电力、石油、化工、航空、航天等各行业,一般都有规定的焊接工艺评定方法。这些焊接工艺评定的方法有的是以专门的一个标准形式发布,有的则是产品标准或规范中的部分内容,如《蒸汽锅炉安全技术监察规程》、JB 4708—2000《钢制压力容器焊接工艺评定》、《钢质海船入级建造规范》、SY/T 0452—2002《石油天然气金属管道焊接工艺评定》、DL/T 868—2004《焊接工艺评定规程》、JGJ 81—2002《建筑钢结构焊接技术规程》及 DL/T 1117《核电

厂常规岛焊接工艺评定规程》等。

焊接参数对焊接工艺性能、焊缝几何形状及焊接质量有很大影响。焊接参数之间有一定的匹配关系，改变其中一个参数时，往往需要同时改变其他一个或多个参数。满足焊缝质量要求的焊接参数方案一般有多种，最佳的焊接参数方案应满足成本低且生产效率高的要求。

1. 焊丝直径

GMAW 用焊丝直径范围较大，一般在 0.6 ~ 3mm 的范围内。焊丝直径的选择主要依据工件厚度、焊接位置及生产效率。半自动焊一般用直径 ≤ 1.6mm 的细焊丝，而厚板自动焊常采用直径 > 1.6mm 的粗焊丝。细丝一般用于薄板焊接，采用短路过渡或脉冲喷射过渡的形式可全位置焊接。粗丝多用于水平位置，采用喷射过渡形式焊接厚板。为了提高生产效率，一般尽可能选用较粗的焊丝，但飞溅较大。焊丝直径的选择可参考表 1-5-7。

细丝通常使用的电流较小，粗丝使用的电流则较大，如直径 1.2mm 的焊丝 CO₂ 焊时电流范围为 80 ~ 350A，而直径 3.0mm 的焊丝自动焊时电流常在 500 ~ 750A 之间，因此选择焊丝直径时应考虑焊机的能力。

在其他焊接参数不变的条件下，焊丝越细，焊缝的熔深越大。

表 1-5-7 直径 0.5 ~ 5.0mm 焊丝的适用范围

焊丝直径/mm	可焊工件厚度/mm	焊接位置	熔滴过渡形式
0.5 ~ 0.8	0.4 ~ 3.2	全位置	短路过渡
	2.5 ~ 4.0	水平	喷射过渡
1.0 ~ 1.4	2 ~ 8	全位置	短路过渡
	2 ~ 12	水平	喷射过渡 (CO ₂ 焊)
	> 6	水平	喷射过渡 (MAG)
	2 ~ 9	全位置	脉冲喷射过渡
1.6	3 ~ 12	全位置	短路过渡
	> 8	水平	喷射过渡 (CO ₂ 焊)
	> 8	水平	喷射过渡 (MAG)
	> 3	全位置	脉冲喷射过渡 (MAG)
2.0 ~ 5.0	> 10	水平	喷射过渡 (CO ₂ 焊)
	> 10	水平	喷射过渡 (MAG)

2. 焊接电流与送丝速度

焊接电流的选择主要是根据工件厚度、焊丝直径及焊接位置的要求来确定。工件较薄、采用细丝及全位置焊时常选用较小的焊接电流，而工件较厚、采用粗丝及水平位置焊接时常选用较大的焊接电流。为提高效率，在满足焊接质量要求的前提下，应尽可能选择较大的焊接电流。如对生产节拍要求较高的场合，常根据焊接速度的要求来确定焊接电流。

在有些情况下，选择焊接电流时应充分考虑母材成分的特点。如对焊接热输入敏感的低合金高强度钢及镍钢焊接时，焊接热输入的大小对焊缝的低温韧性有很大影响，电流过大或过小均不能得到低温韧性合格的焊缝。因此焊接这些材料时，焊接电流与电弧电压、焊接速度的搭配要求比低碳钢更为严格。

焊接电流对焊缝的形状有较大的影响。在其他条件不变时，当焊接电流增加时，熔深和余高增加，熔宽略有增加，熔敷率提高。

采用等速送丝机时，焊接电流是通过调节送丝速度来改变的。不同材料焊接电流与送丝速度的关系如图 1-5-36 所示。从图 1-5-36a 可以看出，随着焊接电流的增大，送丝速度以更高的速度增加，表明焊丝熔化的速度更快，这种现象对细丝更明显。从图 1-5-36 还可以看出，焊丝化学成分对送丝速度与焊接电流之间的关系影响很大。

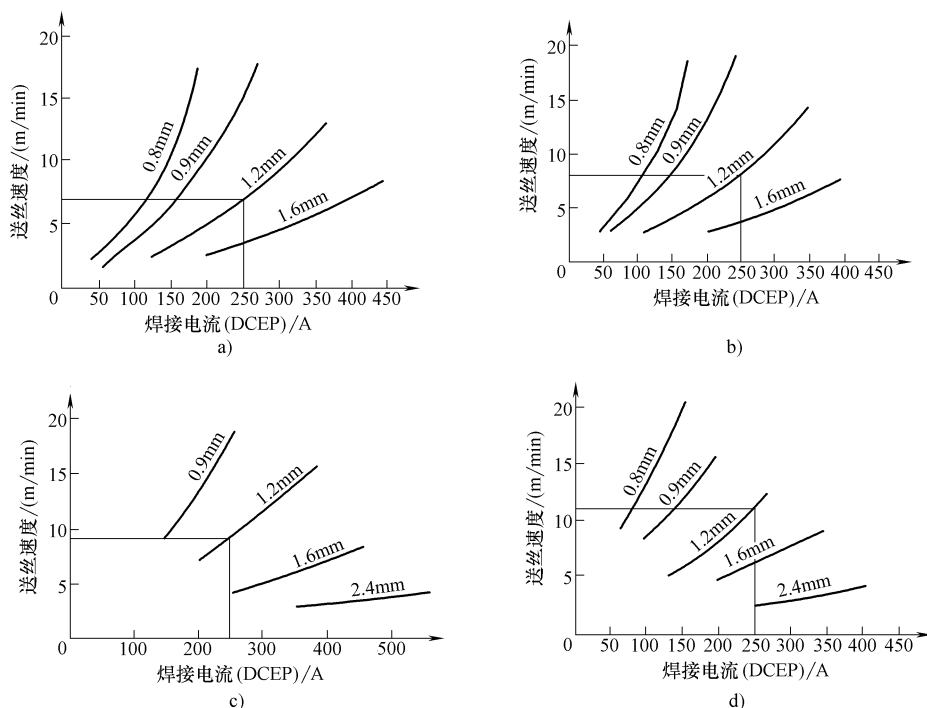


图 1-5-36 不同材料焊接电流与送丝速度的关系

a) 碳钢焊丝 b) 不锈钢焊丝 c) 铝焊丝 d) 铜焊丝

3. 电弧电压

电弧电压的大小应根据焊接电流的大小、保护气体成分、焊丝材料及熔滴过渡形式来确定。当保护气体、焊丝材料及熔滴过渡的形式确定后，主要通过试验确定电弧电压与焊接电流合理匹配，从而保证焊接过程的稳定性、焊缝成形及焊接内在质量。MIG 焊电弧电压与焊接电流的关系如图 1-5-37 所示。

电弧电压对焊接过程的稳定性、焊缝成形、飞溅大小及短路频率等影响很大。短路过渡时，电弧电压较小，弧长较短。若电弧电压增加，弧长将增加，飞溅随着增加，还可能会产生气孔、咬边等缺陷。

在其他条件不变时，电弧电压升高，熔宽随之增加，熔深略变浅，余高减小；电弧电压降低时，熔宽随之减小，熔深增加，余高增大。

4. 焊接速度

焊接速度可调整的范围较大，以厚 1.6mm 碳钢 MAG 焊为例，焊接速度通常可在 30 ~ 105cm/min 范围内调整。为提高生产效率，应尽可能选择较高的焊接速度。当焊件厚度、焊丝直径及焊接位置确定后，焊接速度的设定通常由生产需求（即生产节拍）决定。

焊接速度与焊接电流、电弧电压配合适当时，才能获得良好的焊缝成形。在其他条件不变时，

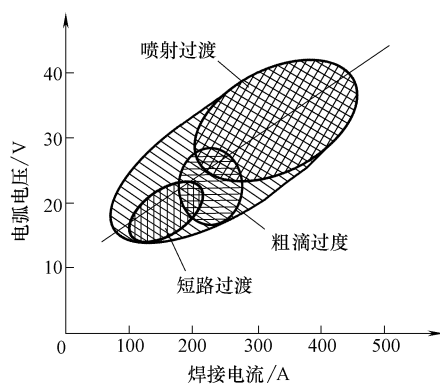


图 1-5-37 MIG 焊电弧电压与焊接电流的关系

焊接速度增加，熔宽、熔深减小，焊道凸出，焊接成形变差；焊接速度过快时，可产生咬边、未焊透等缺陷。焊接速度减小时，熔宽、熔深增加；当焊接速度过慢时，可产生烧穿等焊接缺陷。

5. 焊丝伸出长度

焊丝伸出长度影响焊丝的预热，对焊接过程与焊接质量影响很大。在其他条件不变时，焊丝伸出长度过长，电弧电压下降，焊接电流减小，将引起电弧不稳定并恶化焊缝成形，容易产生未焊透、未熔合等缺陷，同时还需增大保护气量。焊丝伸出长度过短，易烧损导电嘴且易堵塞导电嘴。

短路过渡焊丝伸出长度应为 10 ~ 12 倍的焊丝直径，一般为 6 ~ 13mm，有些场合为便于观察和操作，可适当加长；喷射过渡时焊丝伸出长度为 13 ~ 25mm。

6. 气体流量

气体流量的选择主要根据保护效果与焊接成本来选择。在满足焊接质量的前提下，为降低焊接成本，一般选择较小的气体流量。

气体流量过小，气流不能完全隔绝焊接区域，保护效果差；而气体流量过大，易产生紊流，同样保护效果差。短路过渡时气体流量一般为 12 ~ 15L/min；喷射过渡自动焊时一般为 15 ~ 25L/min；粗丝焊时气体流量可达 30 ~ 50L/min。当施工的环境气流过大对气体保护有影响时，应适当加大保护气体流量。

除根据是否产生气孔来确认保护效果外，还可以通过焊缝表面的颜色来判定，见表 1-5-8。

表 1-5-8 从焊缝表面颜色看保护效果

母材	最好	良好	较好	不良	最差
不锈钢	金黄色或银色	蓝色	红灰色	灰色	黑色
钛及钛合金	亮银白色	橙色	蓝紫色	青灰色	白色
铝及铝合金	银白色有光亮	白色无光	灰白色	灰色	黑色
纯铜	金黄色	黄色	—	灰黄色	灰黑色
低碳钢	灰白色有光亮	灰色	—	—	灰黑色

7. 弧焊电源极性

MIG 焊、MAG 焊及 CO₂ 焊通常均采用直流反极性，即焊丝接弧焊电源正极，工件接弧焊电源负极。其特点是电弧稳定、熔深大、焊缝成形好、飞溅小及焊缝金属含氢量低。而在堆焊、铸铁补焊及高速焊接时，因焊丝熔化效率高、熔深浅、熔宽及余高大常采用直流正接，即焊丝接弧焊电源负极，工件接弧焊电源正极。

5.4.3 常用材料的焊接

1. 低碳钢及低合金钢

CO₂ 焊及 MAG 焊主要用于低碳钢及低合金钢的焊接。低碳钢具有良好的焊接性，采用 CO₂ 焊能得到满意的接头性能。

平焊短路过渡 CO₂ 焊的典型焊接参数见表 1-5-9，平焊喷射过渡 CO₂ 焊的典型焊接参数见表 1-5-10。

当对焊缝外观质量或焊缝力学性能，特别是对韧性有更高要求时，可采用富氩混合气体保护。除保护气体外，MAG 焊临界电流低，其他焊接参数与 CO₂ 焊基本相同。短路过渡及喷射过渡 MAG 焊典型焊接参数分别见表 1-5-11、表 1-5-12。

对于厚板可以采用大电流 MAG 焊，焊接效率高且焊缝成形良好。这种方法采用弧压反馈送丝方式并配用恒流弧焊电源，使用直径超过 4mm 的粗焊丝及富氩保护气体。因为熔池较大，常采用大直径喷嘴双层气体保护。这种喷嘴由两个同心的内喷嘴与外喷嘴组成，气流分别从内外喷嘴喷出。焊接电流与焊接速度对大电流 MAG 焊的焊缝成形影响极大，其影响如图 1-5-38 所示。为提高焊接效率和焊接质量，宜采用双丝焊接。

表 1-5-9 平焊短路过渡 CO₂ 焊的典型焊接参数

板厚/ mm	接头形式	装配间隙 /mm	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(cm/min)	气体流量 /(L/min)	备注
1	I 形对接 (加衬垫)	0~0.5	0.8	60~65	20~21	50	10~12	—
	I 形对接	0~0.3	0.8	35~40	18~19	42	10~12	单面焊双面成形
1.5	I 形对接 (加衬垫)	0.5~0.8	1.0	110~120	21~22	45	10~12	—
	I 形对接	0~0.5	1.0	65~70	20~21	50	10~12	单面焊双面成形
2	I 形对接 (加衬垫)	0~0.8	1.0	130~150	22~24	45	10~12	—
	I 形对接	0.5~1	1.0	120~140	21~23	50	10~12	单面焊双面成形
3	I 形对接	0~0.8	1.0	100~110	21~22	42	10~12	双面焊
4	I 形对接	0~0.8	1.2	140~150	22~24	50	10~12	双面焊

表 1-5-10 平焊喷射过渡 CO₂ 焊的典型焊接参数

板厚 /mm	接头形式	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(cm/min)	气体流量 /(L/min)	备注
8	60°V 形对接	1.6	320~350	34~36	40~46	20	加铜垫
12	双面 60°V 形对接	1.2	310~330	32~33	50	20	—
16	双面 60°V 形对接	1.6	410~430	35~36	45	20	—

表 1-5-11 短路过渡 MAG 焊 (Ar + CO₂) 典型焊接参数

板厚 /mm	焊接 位置	接头 形式	间隙 /mm	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(cm/min)	气体流量 /(L/min)	焊道数
1.0	全位置	I 形对接	0	0.8	55~60	13~14	48~66	12~15	1
1.6	平	I 形对接	0~0.5	1.0	100~105	18~19	85~90	12~15	1
	横	I 形对接	0.8	0.9	105~110	16~17	66~78	12~15	1
	立、仰	I 形对接	0.8	0.9	85~90	15~16	60~72	12~15	1
2.0	平	I 形对接	0~1.6	1.0	130~135	18~19	45~55	12~17	1
	立	I 形对接	0~1.6	1.0	130~135	18~19	50~60	12~17	1

表 1-5-12 喷射过渡 MAG 焊 (Ar + CO₂) 典型焊接参数

板厚 /mm	接头 形式	间隙 /mm	钝边 /mm	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(cm/min)	气体流量 /(L/min)	焊道数
3.2	I 形对接加衬垫	1.6	—	1.0	190~200	26~27	48~66	20~25	1
6.4	I 形对接加衬垫	4.8	—	1.6	310~320	26~27	18~30	20~25	1
9.5	V 形对接加衬垫	2.4	2.4	1.6	340~350	26~27	30~420	20~25	2

2. 不锈钢

奥氏体不锈钢由于热导率小，线胀系数大，薄板焊接时要合理地选择焊接参数及焊接顺序控制焊接变形，必要时采用工装。马氏体不锈钢焊接的主要问题是焊接接头的冷裂纹及脆化，应适当预热、控制好层间温度及焊后热处理。铁素体不锈钢焊接的主要问题是近缝区晶粒长大引起的脆性及冷裂纹，焊前应根据需

要预热。

不锈钢短路过渡 MIG 焊典型焊接参数见表 1-

5-13，喷射过渡 MIG 焊典型焊接参数见表 1-5-14。

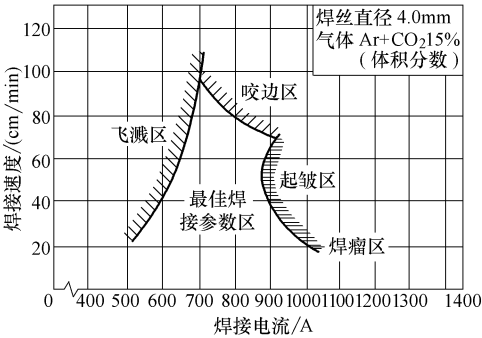


图 1-5-38 大电流 MAG 焊焊接电流与焊接速度的关系

表 1-5-13 不锈钢短路过渡 MIG 焊典型焊接参数

板厚/mm	接头形式	坡口形式	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度 /(cm/min)	气体流量 /(L/min)
1.6	对接	I 形	0.8	85	15	37.5 ~ 52.5	10 ~ 15
2.0				90		28.5 ~ 31.5	
1.6	T 形			85		42.5 ~ 47.5	
2.0				90		32.5 ~ 37.5	

表 1-5-14 不锈钢喷射过渡 MIG 焊典型焊接参数

板厚/mm	焊接位置	接头形式	正反面焊接层数	间隙 /mm	钝边 /mm	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(cm/min)	气体流量 /(L/min)
3	平	I 形	1	0 ~ 2	—	1.6	200 ~ 240	22 ~ 25	40 ~ 55	14 ~ 18
	立	对接加垫					180 ~ 220	22 ~ 25	35 ~ 50	
6	平	I 形对接	正反各 1				220 ~ 260	23 ~ 26	30 ~ 50	
	立							200 ~ 240	22 ~ 25	
12	平	V 形对接	正 4 反 1		0 ~ 2		240 ~ 280	24 ~ 27	20 ~ 35	
	立		正 5 反 1				220 ~ 260	23 ~ 26	20 ~ 40	

3. 铝及铝合金

铝及铝合金的热导率约为钢的 5 倍，焊接时必须提供足够的能量，必要时应预热才能保证正常焊接过程。焊前清理、利用阴极清理是防止气孔、获得良好焊缝的重要措施。铝及铝合金的加热膨胀及冷却收缩变形量约为钢的 2 倍，薄板焊接时应选择合适的焊接参数及焊接顺序控制焊接变形，必要时应使用工装。热处理强化铝合金焊接接头热影响区因软化强度降低，可以通过时效处理恢复或接近母材水平。

铝合金短路过渡 MIG 焊典型焊接参数见表 1-5-15、喷射过渡 MIG 焊典型焊接参数见表 1-5-16。

表 1-5-15 铝及铝合金短路过渡 MIG 焊典型焊接参数

板厚/mm	焊接位置	接头形式	焊接层数	间隙/mm	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(cm/min)	氩气流量/(L/min)
2	全位置	I 形对接加衬垫	1	3.2	0.8	110 ~ 130	18 ~ 23	64 ~ 76	14
	平			0	0.8 ~ 1.2	90 ~ 150	18 ~ 22	64 ~ 114	14
3	全位置			4.8	0.8 ~ 1.2	110 ~ 135	19 ~ 23	45 ~ 71	14
	平、立、横			0 ~ 2.4	0.8 ~ 1.2	120 ~ 150	20 ~ 24	60 ~ 76	14

表 1-5-16 铝及铝合金喷射过渡 MIG 焊典型焊接参数

板厚 /mm	接头 形式	坡口角 度(°)	间隙 /mm	钝边 /mm	焊接 层数	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(cm/min)	氩气流量 /(L/min)
4	I 形对接	—	0 ~ 2	—	1	1.6	170 ~ 210	22 ~ 24	55 ~ 75	16 ~ 20
6	I 形对接	—		—			230 ~ 270	24 ~ 27	40 ~ 55	20 ~ 24
	V 形对接	60		0 ~ 2	2		170 ~ 190	23 ~ 26	60 ~ 70	20 ~ 24
8	V 形对接	60					240 ~ 290	25 ~ 28	45 ~ 60	20 ~ 24
	双面 V 形	60	1 ~ 2	1 ~ 3			250 ~ 290	24 ~ 27	45 ~ 55	20 ~ 24

4. 铜及铜合金

铜及铜合金导热能力很强，焊接时热量的迅速散失使母材与熔化的焊丝之间难于熔合，易产生未焊透与未熔合，因此焊前应预热。与铝及铝合金一样，铜及铜合金易产生焊接变形，应采取相应的工艺措施。焊接接头的晶粒粗大及脆化常导致铜及铜合金接头力学性能下降。此外，杂质对接头的污染及合金化、合金元素的烧损、接头的各种缺陷等使接头导电及耐蚀性均有所下降。铜的 MIG

焊的典型焊接参数见表 1-5-17。

采用内层 Ar25% + He75%（体积分数）混合气体、外层纯 Ar 双层气体保护，使用直径 4mm 以上的焊丝可以对厚板大电流 MIG 焊，焊接电流可达 760 ~ 1000A。

表 1-5-17 铜对接接头喷射过渡 MIG 焊典型焊接参数

板厚 /mm	接头 形式	坡口角度 (°)	间隙 /mm	钝边 /mm	焊接 层数	焊丝直径 /mm	预热温度 /℃	焊接电流 /A	焊接速度 /(cm/min)	保护气体 (体积分数)
<4.8	I	—	0~0.8	—	1~2	1.6	38~93	180~250	35~50	Ar
6.4	V	80~90	0	1.6~2.4	1~2	1.6	93	250~325	24~45	Ar25% + He75%
12.5	双 V	80~90	2.4~3.2	2.4~3.2	2~4		316	330~400	20~35	
>16	双 U	30	0	3.2	3~6		472	330~400	15~30	
								500~600	20~35	

5.4.4 焊接缺陷的控制

GMAW 焊接缺陷主要有气孔、飞溅、裂纹、咬边、未焊透、未熔合及焊缝成形不良等。产生的原因与焊前准备、焊接参数的选择、焊接材料的选择及焊工操作手法等因素有关。

1. 气孔与飞溅

低碳钢及低合金钢 CO₂ 焊产生气孔与飞溅的原因与防止措施在 5.1.3 节已有分析。

铝及铝合金在熔化状态下会吸收一些气体，同时表面极易形成的 Al₂O₃ 更容易吸收水分，因此铝及铝合金 MIG 焊时，对焊丝及母材表面的水、油、锈等污染十分敏感，稍不留意就会产生气孔。焊接前应仔细对焊丝及母材表面进行清理。

铜及其合金对气孔也很敏感，一方面是因为焊缝金属冷却过程中，氢的溶解度不断下降，而且铜及铜合金的热导率大，冷却更快，氢来不及逸出便形成气孔；另一方面液态铜中氢与 Cu₂O 反应生成的水汽如不能逸出，也会产生气孔。

防止产生气孔的主要措施是做好接头及焊接材料的清理、降低保护气体杂质的含量并加强气体保护，减少氢、氧的来源及降低熔池冷却速度等，有关方法详见 5.4.1 节。

2. 冷裂纹

防止冷裂纹的主要措施包括做好接头与焊丝的清理及保证保护气体的纯度；进行必要的预热和后热，降低焊缝冷却速度；采用合理的焊接顺序，减小焊接应力。焊接热输入过小时易产生冷裂纹，应当避免。

3. 热裂纹

防止热裂纹的主要措施有减少焊接过程中的拘束、预热降低冷却速度并减少应力、降低焊接材料中杂质元素含量及填满弧坑等。低碳钢和低合金钢焊接时，过大的焊接速度及焊接电流均可能产生热裂纹。

4. 未焊透与未熔合

钢 GMAW 焊时产生未熔合与未焊透的原因常是焊接电流、电弧电压与焊接速度不合适，如焊接电流过小，焊接速度过快，因此应选择合适的焊接电流及焊接速度。坡口角度太小、钝边太大、间隙太小易产生未焊透，可适当加大间隙，减小钝边。此外操作手法不当，如焊丝摆动到坡口两侧停留时间太短时易产生未熔合，应增加停留时间。对铜及铜合金，因导热快，往往需要采取焊前预热和在保护气体中加入氦气的方法。

5. 咬边

防止咬边的主要措施是选择合适的焊接参数。焊接速度太高、电弧电压太高及电流过大都能产生咬边。

对于半自动焊,焊接操作手法不当会产生气孔、咬边、未熔合、未焊透、焊缝成形不良等诸多焊接缺陷,应通过正规的焊工培训提高焊工的操作技术水平。

5.5 特殊熔化极气体保护电弧焊技术

5.5.1 熔化极气体保护焊电弧控制技术

1. CO₂ 焊熔滴过渡控制技术

为解决 CO₂ 焊飞溅大、焊缝成形差及熔深浅等问题,国内外研究者在对短路过渡机理深入研究的基础上,利用电子电力技术及计算机技术,通过弧焊电源对熔滴过渡进行控制,取得了较好的效果,一些研究成果在新型电源上得到了应用。

(1) 优化控制弧焊电源的外特性 一般认为短路过渡飞溅主要在瞬时短路及“小桥”爆断时产生,传统弧焊电源的输出回路上串联电抗器来限制短路电流上升速度及短路电流峰值,不能满足形成缩颈时要求大电流而爆断前要求小电流的要求,只能在一定程度上减少飞溅。采用电子电抗器后,出现了双阶梯型外特性、复合外特性及三维外特性等多种控制方法。通过控制电弧工作点,使电弧工作在特性曲线的不同区段来满足短路过渡不同动态过程的需求。

(2) 电弧电压与焊接电流的闭环控制 在平特性弧焊电源的基础上,为避免焊丝伸出长度、送丝速度等随机因素对焊接稳定性的影响,对电弧电压与焊接电流进行闭环控制。主要方法有:通过研究短路过程周期及其变化率、短路持续时间及其变化率对焊接飞溅的影响,模糊控制电弧电压达到与焊接电流的良好匹配;以短路频率为寻优目标,通过寻求最高过渡频率来微调电弧电压初选值来调节电弧电压,实现与送丝速度的最优匹配;通过检测电弧的光、声信号调整电弧电压适应送丝速度的变化等。

(3) 波形控制法 电压、电流波形控制法是对熔滴过渡在不同阶段,针对熔滴受力受热的不同需要进行实时控制,在实现稳定焊接过程的同时最大限度地减少飞溅的一种电弧控制方法。

2. CO₂ 焊的短路过程及其波形控制

(1) 精细电流波形控制法 国外有代表性的是 Lincoln 公司的 STT (Surface Tenshin Transfer) 表面张力过渡控制技术及 Fronius 公司的 CMT (Cold Metal Transfer) 冷金属过渡控制技术。采用这两项技术的电源既不是恒压的,也不是恒流的,而是对电流电压进行控制的一种电源。

1) STT 表面张力过渡控制方法是使熔滴在电磁收缩力和表面张力的作用下,实现从焊丝端头向熔池过渡的一种波形控制技术。STT 电流波形如图 1-5-39 所示,每个熔滴过渡周期可分为以下几个阶段:

① 燃弧阶段 $T_0 \sim T_1$ 。基值电流维持电弧燃烧及熔滴长大。

② 短路前期 $T_1 \sim T_2$ 。刚短路时,电源输出电流迅速降低到低值,熔滴依靠重力及表面张力向熔池过渡,形成“小桥”。

③ 短路中期 $T_2 \sim T_3$ 。熔滴开始铺展,此时电源输出一个大电流,促使“小桥”产生缩颈。

④ 短路后期 $T_3 \sim T_5$ 。在熔滴与焊丝将要分离时,电源输出电流迅速降低到一个较小值,表面张力促使分离后的熔滴进入熔池,避免产生较大的飞溅。

⑤ 再引弧阶段 $T_5 \sim T_7$ 。熔滴与焊丝分离后,电流迅速上升到一个较大值,实现快速引燃电弧。随后电流下降到基值电流,进入下一个过渡周期。

STT 控制方法使焊接飞溅及焊缝成形得到很大改善,与传统的焊接工艺相比,飞溅降低了 90%,烟尘降低了 50%。这种 STT 焊接工艺可采用氩气、氦气及 CO₂ 气体焊接碳钢、低合金钢及高合金钢等,主要用于薄板单面焊双面成形,在管道根焊中得到了广泛应用。

2) CMT 冷金属过渡控制技术的原理是将送丝与熔滴过渡协同控制。电弧引燃后,焊丝向焊件送进,当数字化的过程控制监测到一个短路信号,就会反馈给送丝机,送丝机作出回应回抽焊丝,从而使得焊丝与熔滴分离,完成熔滴过渡;此后再次引燃电弧,焊丝向焊件送丝,开始下一个循环,如图 1-5-40 所示。

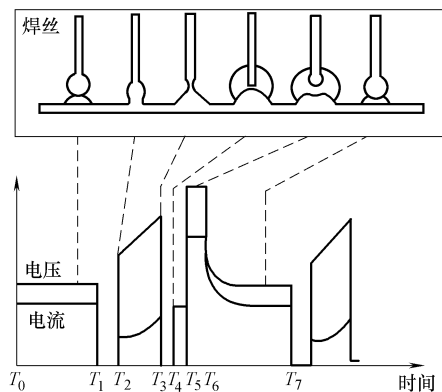


图 1-5-39 STT 电压电流波形示意图

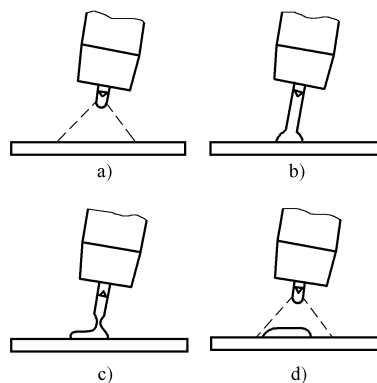


图 1-5-40 CMT 冷金属过渡的原理图

- a) 脉冲燃弧阶段 b) 焊丝进给阶段
c) 回抽焊丝阶段 d) 再次燃弧阶段

CMT 冷金属过渡方式完全区别于传统的熔滴过渡方式,短路过程能被精确地控制,周期恒定,不再受随机变量的影响,熔滴过渡的频率达到 70 次/s。短路过渡时电压、电流几乎为零,消除了产生飞溅的原因,热输入也几乎为零,整个焊接过程是高频率的“热”、“冷”交替过程。CMT 弧长能精确控制,电弧非常稳定,焊缝成形更均匀,能很容易地焊接 0.3mm 薄板。CMT 焊接具有良好的搭桥能力,对搭接接头间隙要求低。

CMT 冷金属过渡控制技术开始用于 MIG/MAG 焊或者钎焊,主要焊接薄板。随着 CMT 工艺研究的深入,应用的范围不断扩大。比如 CMT 工艺与脉冲工艺相结合、采用 CO_2 气体代替富氩混合气体 ($\text{Ar}82\% + \text{CO}_2 18\%$, 体积分数) 等,在具有极高电弧稳定性及无飞溅的同时,获得更高的焊接速度或更大的熔深,从而可焊接较厚的板。目前,CMT 工艺主要用于大间隙的镀层板、钢与铝等异种金属、高强度钢及超高强度钢的钎焊。

(2) 能量控制法 能量控制法的原理是在熔滴刚与熔池接触时,将焊接电流调到一设定值并持续一段时间,使得熔滴在熔池中均匀铺开。接着迅速提供短路峰值电流,促进颈缩及分离。随即电弧重新引燃,电源提供燃弧峰值电流快速熔化焊丝。燃弧峰值电流持续一定时间后降低到燃弧基值电流,直到下一个短路阶段的到来,从而完成一次能量控制。燃弧峰值电流的持续时间决定了熔滴大小。能量控制法的波形如图 1-5-41 所示。

(3) 焊接波形的动态控制方法 动态控制方法是通过焊接过程的实时监测,对输出的波形自动进行调整,达到焊接波形满足焊接过程的目的。这种动态控制方法主要有电流幅值调整、阶段电流持续时间调整、对不同焊接过程交替周期调整、 CO_2 焊恒频自适应控制及

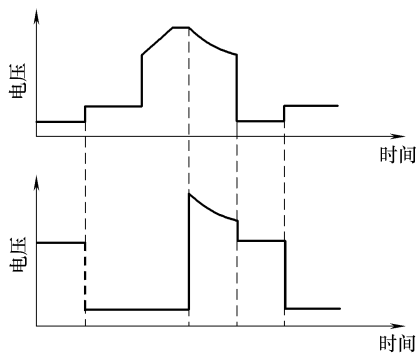


图 1-5-41 能量控制法波形

熔滴尺寸控制等。

3. 低飞溅 CO_2 焊的控制

使用超低碳焊丝、活化处理焊丝及药芯焊丝均能减少焊接飞溅。上述 CO_2 焊熔滴过渡控制技术均能获得低飞溅甚至是无飞溅的 CO_2 焊。

除了这些方法之外,还有改变送丝方式控制法。这种控制方法的基本思路是采用焊丝运动的机械力与短路电流的控制相配合来帮助熔滴过渡,减少熔滴过渡对电磁收缩力的依赖,降低熔滴分离时产生的飞溅。其主要方法有脉动送丝、机械振动送丝、PWM 控制送丝、双曲面滚轮行星式送丝及模糊控制送丝等。

5.5.2 熔化极脉冲氩弧焊的电弧控制

1. 熔化极脉冲氩弧焊的原理与特点

熔化极脉冲氩弧焊 (Gas Metal Arc Welding-pulsed Arc) 的原理是焊接电流以一定的频率来控制焊丝的熔化及熔滴过渡,可以在平均电流较小的条件下实现稳定的喷射过渡,并可对母材的热输入和焊缝成形进行控制。熔化极脉冲氩弧焊的典型电流波形如图 1-5-42 所示。

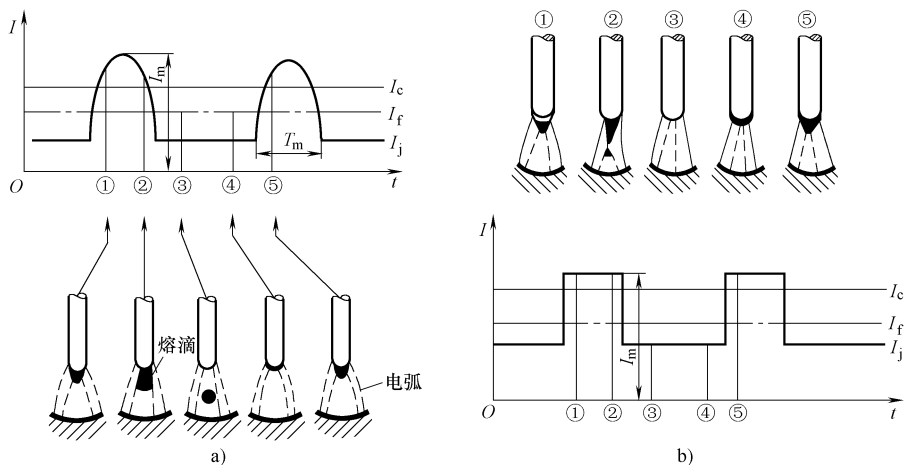


图 1-5-42 熔化极脉冲氩弧焊的典型电流波形

a) 正弦波 (铝焊丝) b) 矩形波 (钢焊丝)

I_m —脉冲电流峰值 I_c —喷射过渡临界电流 I_f —平均电流 I_j —基值电流

熔化极脉冲氩弧焊可以在平均电流小于临界电流条件下实现喷射过渡,范围从几十安到几百安,覆盖了一般 MIG 焊的短路过渡及喷射过渡的电流范围,因此既可以焊接薄板,也可以焊接厚板。通过调节基值电流 I_j 、脉冲电流 I_m 、脉冲维持时间 T_m 及脉冲间歇时间 T_j ,可以将焊接热输入控制在较低水平,减少焊接热影响区及工件变形,实现全位置焊接。脉冲电弧对熔池具有强烈的搅拌作用,有助于消除焊接缺陷,提高焊接质量。通过调节脉冲频率及脉冲峰值电流等参数,可以实现一个脉冲过渡一个熔滴、一个脉冲过渡多个熔滴及多个脉冲过渡一个熔滴,其中一个脉冲过渡一个熔滴为最佳。这是一种先进的焊接方法,特别是对热敏感性高的材料、难于施焊的空间位置及要求单面焊双面成形工件的焊接显示出优良的特性,得到了广泛应用。

熔化极脉冲氩弧焊的参数主要有 I_j 、 I_m 、 T_m 、 T_j 、脉冲周期 T ($T = T_m + T_j$)、脉冲频率 f ($f = 1/T$)、脉冲幅比 F ($F = I_m/I_j$)、脉冲宽比 K ($K = T_m/T_j$) 及焊接速度,其余参数与普通 GMAW 焊相同。

熔化极脉冲氩弧焊在焊接过程中主要存在以下问题：一是在维弧期间，随机的外界干扰作用可引起电弧不稳、容易断弧或短路；二是在脉冲期间，若采用平特性弧焊电源，受外界干扰时电流随弧长变化而波动；若采用陡降特性电源，受外界干扰时电压随弧长变化而波动。为解决这些问题，并方便焊接参数的调整，国内外发展了多种电弧控制方法，如 Synergic 法、弧长闭环控制法及电弧自适应调节法等。

2. 脉冲电弧的闭环控制系统

脉冲电弧闭环控制法的基本原理是利用弧长信号闭环反馈控制脉冲参数，实时改变熔化速度，使弧长保持稳定。获取弧长信息的方法是在每个脉冲的特定点对电弧电压采样，作为弧长信号反馈，通过调整脉冲参数（如 T_j ）实现对脉冲电弧的控制并能得到稳定的熔滴过渡。这种控制方法抗干扰能力强，应用效果优良。

3. 熔化极脉冲氩弧焊电弧自适应控制

利用多折线扫描外特性对弧长的调节作用，可以实现熔化极脉冲氩弧焊电弧自适应控制，如图 1-5-43 所示。 a 点为空载电压， bc 段用于控制维弧电流， de 段用于保持恒定的脉冲电流， ef 及 fg 段用于控制短路电流以保证引弧。当弧长趋小时，电弧电压趋小，电弧工作点能够从 bc 段快速跳到 d 段上，即由维弧电流突变为脉冲电流；后随喷射过渡弧长趋大，电弧电压趋高，电弧工作点又能快速跳到 bc 段，即由脉冲电流回到维弧电流。上述过程自动重复进行，电弧在维弧电流与脉冲电流之间不断跳变，自动维持了焊丝熔化速度与送丝速度之间的平衡。

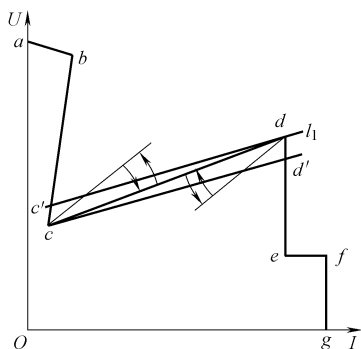


图 1-5-43 弧焊电源多折线扫描外特性

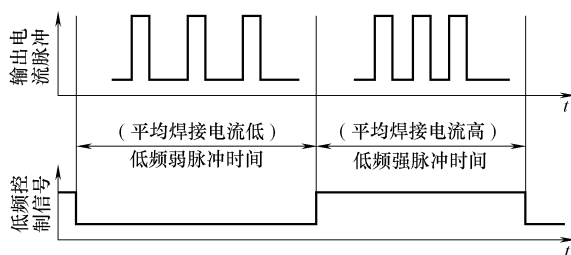


图 1-5-44 铝合金双脉冲 MIG 焊的控制原理

4. 铝合金双脉冲熔化极脉冲氩弧焊

铝合金双脉冲 MIG 焊的控制原理如图 1-5-44 所示。在焊接电流以较高频率脉冲输出保证一脉一滴的同时，使平均焊接电流与电压以较低的频率作周期性的变化。其结果造成焊丝熔化和弧长的周期性变化，一方面影响母材的受热而影响焊缝熔深、熔宽及成形；另一方面影响到熔池受力，使熔池搅动，有利于气体逸出减少气孔，细化晶粒并减少裂纹倾向。

5. 其他脉冲波形控制方法

除上述控制方法外，还有 Synergic 控制法、电弧电压及送丝速度信号均用于反馈的综合控制法、在线自动寻优法及广义预测控制法等，这里不做详述。

5.5.3 熔化极气体保护气电立焊

1. 气电立焊的原理与特点

气电立焊的原理如图 1-5-45 所示。厚板立焊接头用铜制水冷滑块挡住构成封闭的空间，焊丝伸进接头底部的引弧板引燃电弧形成熔池。随着熔池的上升，焊枪自动垂直移动及沿厚度方向摆

动。熔化的焊丝与母材流入到电弧下面的熔池中，滑块随焊接机头向上移动使焊缝强制成形，自下而上完成整条垂直焊缝的焊接。气电立焊最常用的坡口为I形、V形及X形。采用V形及X形坡口时，外侧采用水冷滑块，而内侧采用固定陶质衬垫强制成形，其优点主要是熔化金属量小、热输入少及热影响区小。近年发展了双丝气电立焊技术用于船舶的制造，具有生产率高、焊接变形小及消耗焊接材料少等优点。

气电立焊的工作方式与电渣焊类似，与电渣焊相比具有焊接熔池易观察、重新焊接容易、焊接热输入小及焊缝冲击韧度明显改善的特点，主要用于船舶、桥梁、大型容器等碳钢及低合金钢12 ~ 75mm 中厚板的立对接焊。

2. 弧焊设备

气电立焊的设备主要包括弧焊电源、焊枪及摆动机构、送丝系统、送气系统、水冷滑块、冷却水循环装置、升降机构及控制装置等。

(1) 弧焊设备 一般采用垂直陡降或平特性的弧焊整流器，直流反接；负载持续率要求 100%，额定电流 600 ~ 1000A。

(2) 焊枪及摆动机构 气电立焊用的焊枪与普通 GMAW 用焊枪基本相同。为方便在接头中垂直移动与摆动，焊枪设计得窄小些，一般厚度不超过 10mm。此外常采用水冷式焊枪。摆动机构能使焊枪在水冷滑块附近停留一段时间，保证靠近滑块的母材外表面熔透良好。

(3) 送丝装置 采用推丝式送丝装置，与普通 GMAW 用送丝装置相似。

(4) 水冷滑块 滑块的内部表面加工成凹槽，保证有合适的焊缝外形。

(5) 送气系统 能在熔池上面提供均匀且没有紊流的保护气体。保护气体可由专门的气箱全部供给，也可以利用焊枪增加部分保护气体。

(6) 升降机构 通常采用齿轮齿条、链传动等方式。升降机构按给定的速度使焊接装置垂直移动，其运行速度即为焊接速度。

(7) 控制装置 其主要作用是控制焊接过程的稳定进行，包括控制弧焊装置的移动、气体流量、焊枪摆动及冷却水流量等，保证焊接电流、电弧电压及送丝速度等焊接参数的匹配。

3. 弧焊工艺

实心焊丝的直径常为 1.6mm、2.0mm、2.4mm；药芯焊丝的直径常为 1.6 ~ 3.2mm。使用实心焊丝时常用富氩混合气体保护，而使用药芯焊丝时常用 CO₂ 气体保护。气电立焊的焊接参数见表 1-5-18。

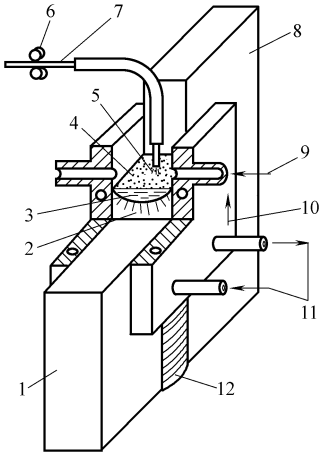


图 1-5-45 气电立焊原理示意图

1—母材 2—凝固金属 3—熔融金属 4—熔渣
5—电弧 6—送丝轮 7—焊丝 8—母材
9—保护气体 10—铜滑块 11—冷却水 12—焊道

表 1-5-18 气电立焊的焊接参数

板厚/mm	根部间隙/mm	焊丝根数	焊接电流/A	电弧电压/V	焊枪摆幅/mm	摆动速度/(mm/min)	焊接速度/(mm/min)
12	25	1	500	34 ~ 36	0	0	30
25	25	1	600	37 ~ 39	0	0	30
50	25	1	725	38 ~ 40	0	0	25
75	6 ~ 25	1	750	39 ~ 41	10 ~ 50	25	16

5.5.4 窄间隙熔化极气体保护电弧焊

1. 工作原理与特点

窄间隙熔化极气体保护电弧焊的工作原理如图 1-5-46 所示。这种弧焊方法有细丝窄间隙焊和粗丝窄间隙焊两种形式。细丝直径 0.8 ~ 1.2mm，坡口间隙 6 ~ 9mm，可进行单道或双道焊接。粗丝直径 2 ~ 3mm，间隙 10 ~ 15mm，可进行单道多层焊。

窄间隙焊常用窄而深的 I 形坡口或坡口角很小的 V 形坡口，可以节约焊接材料，提高生产效率，降低生产成本。焊接时热输入小，能减少焊接热影响区，改善接头的冲击韧性，残余应力小和变形小。后层焊道焊接时对前层焊道有回火的作用，可以降低焊前预热或焊后热处理的要求。

窄间隙焊主要用于焊接低碳钢、低合金钢、高合金钢、铝合金及钛合金等，可以全位置焊，焊接板材厚度范围为 30 ~ 300mm。窄间隙焊在锅炉、压力容器、压力管道、海洋平台、造船及桥梁等领域均得到应用。

2. 窄间隙焊的送丝方式

细丝窄间隙焊的典型送丝方式如图 1-5-47 所示。

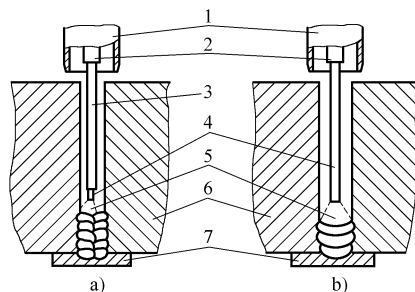


图 1-5-46 窄间隙熔化极气体保护电弧焊的工作原理示意图

a) 细丝窄间隙焊 b) 粗丝窄间隙焊
1—喷嘴 2—导电嘴 3—绝缘导管 4—焊丝
5—电弧 6—母材 7—衬垫

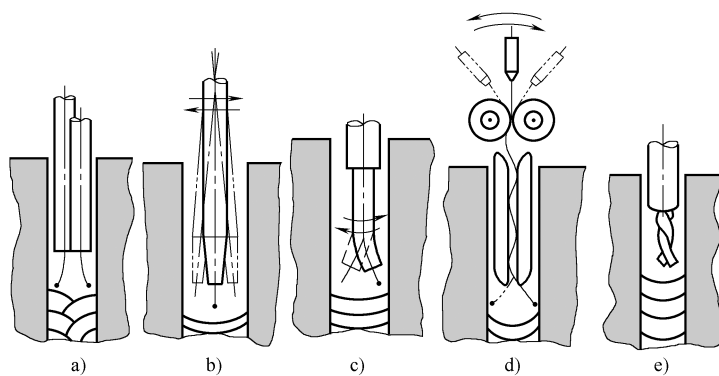


图 1-5-47 细丝窄间隙焊的典型送丝方式

a) 前后交错双丝 b) 摆动单焊丝 c) 编织单焊丝 d) 预弯单焊丝 e) 麻花状焊丝

图 1-5-47a 为将两根焊丝和两个导电嘴一前一后放置，每根焊丝指向各自侧壁，保证两侧母材均匀受热熔合。图 1-5-47b、c 为单焊丝通过导电嘴在坡口内对称摆动的送丝方法。图 1-5-47d 是使焊丝变成波浪状后再进入导电嘴，从导电嘴出来的焊丝随着不断熔化，电弧在坡口两侧之间摆动。图 1-5-47e 是将两根焊丝扭成麻花状后再进入导电嘴，每根焊丝熔化时，电弧自动绕麻花焊丝的中心轴旋转，使母材两侧均匀受热熔合。

粗丝不需摆动就能熔化坡口两侧的母材，但因采用大电流一般仅用于平焊。

3. 弧焊工艺

窄间隙 GMAW 常用普通直流弧焊电源，也可以用脉冲弧焊电源，采用直流反接、喷射过渡。与普通 GMAW 一样，需根据母材性质、焊接位置、力学性能等要求设定焊接参数。

5.6 药芯焊丝 CO₂ 气体保护焊的原理、特点及应用

5.6.1 药芯焊丝的结构与分类

1. 药芯焊丝的结构

药芯焊丝由金属外皮和药芯（即芯部药粉）两部分构成。其横截面形状可分为简单的 O 形截面和复杂截面两类，如图 1-5-48 所示。

O 形截面的药芯焊丝又分有缝 O 形焊丝和无缝 O 形焊丝。有缝 O 形焊丝又分对接 O 形焊丝和搭接 O 形焊丝两种。有缝 O 形焊丝因截面形状简单，容易生产，生产成本低，常用于直径 2.0mm 以下的细丝。无缝 O 形焊丝的优点在于焊丝的防潮性能好，表面可以镀铜增强导电性，但因生产设备复杂及生产成本低，实际生产应用比有缝 O 形焊丝要少得多。

横截面						
符号						
类别	无缝	对接	搭接	T 形	E 形	双层

图 1-5-48 药芯焊丝的截面形状示意图

复杂截面包括 T 形、E 形、双层形等。小直径复杂截面药芯焊丝不易加工，一般直径在 2.0mm 以上的粗丝才选用复杂截面。与 O 形截面药芯焊丝相比，复杂截面药芯焊丝的主要优点在于送丝轮压力对其截面形状的改变较小、送丝稳定且电弧稳定性好，能减少飞溅。焊丝越细，焊接过程中电流密度越大，截面形状对焊接过程稳定性的影响越小。

细直径药芯焊丝可用于全位置焊，粗直径药芯焊丝多用于平焊及平角焊。

熔渣型药芯的成分与焊条药皮相似，有稳弧剂、造渣剂、脱氧剂及合金元素等，在焊接过程中的作用与焊条药皮相同。

2. 药芯焊丝的分类

(1) 按保护方式分 按焊接过程中的保护方式，药芯焊丝可分为气体保护焊用焊丝、埋弧焊用焊丝及自保护药芯焊丝。

根据保护气体的种类，气体保护焊用药芯焊丝可分为 CO₂ 焊、MIG 焊、MAG 焊及 TIG 焊用药芯焊丝，主要用于结构件的生产，其中 CO₂ 焊药芯焊丝使用量最大。埋弧焊用药芯焊丝一般使用常用的烧结焊剂和熔炼焊剂，主要用于表面堆焊。自保护药芯焊丝在焊接过程中不需要外加气体或焊剂保护，依靠自身的造渣剂、造气剂在电弧高温下产生的气体与渣对焊接区域进行保护。

(2) 按金属外皮材料分 按金属外皮的材料可分为低碳钢、不锈钢、镍及其合金、铝及其合金等药芯焊丝，其中低碳钢加工性能优良，使用量最大。

(3) 按药芯类型分 按药芯类型分为有渣型及无渣型两类。无渣型即金属粉芯型，主要用于埋弧焊及高速 CO₂ 焊。有渣型药芯焊丝按渣的碱度可分为酸性渣和碱性渣两类。目前 CO₂ 焊用药芯焊丝使用量最大的为钛型（酸性）渣系。

(4) 按被焊接材料分 按被焊接材料可分为低碳钢、低合金钢、镍钢、不锈钢、镍及其合金等材料用药芯焊丝。

5.6.2 药芯焊丝 CO_2 焊的原理与特点

药芯焊丝 CO_2 焊是一种气渣联合保护的弧焊方法,如图 1-5-49 所示。除有气体保护外,焊接过程中药芯受热熔化,产生的渣覆盖在焊缝表面进一步保护。它具有以下特点。

1. 焊接工艺性能好

与实心焊丝 CO_2 焊相比,药芯能改变熔滴过渡形态,细化熔滴,药芯焊丝 CO_2 焊时电弧稳定、飞溅很小且焊缝成形美观,可全位置焊,而且气渣联合保护提高了抗气孔的能力。

2. 熔敷速度快

药芯焊丝 CO_2 焊时,电流通过很薄的金属外皮,电流密度高,焊丝熔化速度快,熔敷速度高于实心焊丝,生产效率高。

3. 易调整合金性能

药芯焊丝可通过改变金属外皮及药芯成分得到不同性能的焊缝金属,与实心焊丝只能通过改变焊丝金属的化学成分相比更为方便,特别是对低合金高强度钢优势更明显。

4. 综合成本低

焊接生产成本由焊接材料、辅助材料、人工费用、能源消耗、生产效率及焊丝熔敷率等指标综合构成。采用药芯焊丝焊接相同厚度(中厚板以上)的工件,单位长度焊缝的综合成本不到焊条电弧焊的一半,且略低于实心焊丝。

药芯焊丝应用存在的主要问题是制造设备与工艺复杂导致售价高、有缝药芯焊丝的防潮性低于实心焊丝等。目前药芯焊丝已广泛用于冶金工程、造船、海洋平台、油气管线、压力容器及机械制造等领域。

5.6.3 药芯焊丝 CO_2 焊设备

药芯焊丝 CO_2 焊与实心焊丝 CO_2 焊设备相同。一些标有实心、药芯两用的弧焊机只是增加了极性转换、弧焊电源外特性微调 and 电弧挺度调节功能中的一种或多种。

与实心焊丝相比,药芯焊丝的刚度较差,焊丝较软,因此在使用加粉系数较大的药芯焊丝时,最好选用药芯焊丝专用送丝机。这种送丝机的主要特点是采用两对主动轮驱动、上下轮均开 V/U 形槽、槽内压花等。

5.6.4 药芯焊丝的标准及其选用

目前我国已颁布的药芯焊丝标准有:GB/T 10045—2001《碳钢药芯焊丝》;GB/T 17493—2008《低合金钢药芯焊丝》;GB/T 17853—1999《不锈钢药芯焊丝》。

药芯焊丝的选择原则与实心焊丝基本相同,但也有特殊性。如 $\text{EF} \times 2$ 型焊丝适用于单道焊,当用于多道焊时,因焊丝中含有较多的脱氧剂锰与硅,焊缝硬度偏高易产生裂纹。当焊缝的力学性能要求高时,应注意药芯焊丝熔敷金属扩散氢含量是否满足接头质量要求,一般应选择碱性渣系的焊丝。此外还应注意药芯焊丝对焊接位置的适应性等。

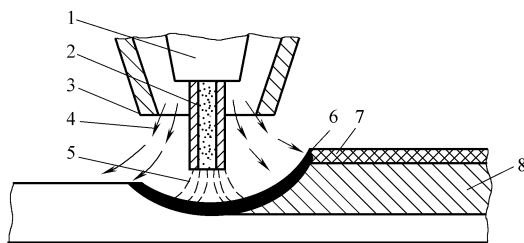


图 1-5-49 药芯焊丝 CO_2 焊示意图

1—导电嘴 2—药芯焊丝 3—喷嘴 4—保护气体
5—电弧 6—熔池 7—熔渣 8—焊缝金属

5.6.5 药芯焊丝 CO₂ 焊工艺

药芯焊丝 CO₂ 焊的焊接参数种类及其设定和对焊接质量、焊缝成形的影响，与实心焊丝焊接时基本相同。表 1-5-19 为不同直径药芯焊丝 CO₂ 焊时焊接电流、电弧电压的范围。表 1-5-20 为不同位置药芯焊丝 CO₂ 焊时焊接电流、电弧电压的范围。表 1-5-21 为碳钢药芯焊丝 CO₂ 焊时的焊接参数。

表 1-5-19 不同直径药芯焊丝 CO₂ 焊时焊接电流、电弧电压的范围

焊丝直径/mm	1. 2	1. 4	1. 6
焊接电流/A	110 ~ 350	130 ~ 400	150 ~ 450
电弧电压/V	18 ~ 22	20 ~ 24	22 ~ 38

表 1-5-20 不同位置药芯焊丝 CO₂ 焊时焊接电流、电弧电压的范围

焊接位置	焊丝直径 1. 2mm		焊丝直径 2. 0mm	
	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接电流/A	电弧电压/V
平焊	160 ~ 350	22 ~ 32	180 ~ 350	22 ~ 28
横焊	180 ~ 260	22 ~ 30	180 ~ 250	22 ~ 25
向上立焊	160 ~ 240	22 ~ 30	180 ~ 220	22 ~ 25
向下立焊	240 ~ 260	25 ~ 30	220 ~ 260	24 ~ 28
仰焊	160 ~ 200	22 ~ 25	180 ~ 220	22 ~ 25

表 1-5-21 碳钢药芯焊丝 CO₂ 焊时的焊接参数

板厚/mm	坡口	层数	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(cm/min)	气体流量 /(L/min)
3. 2	I 形对接加垫、间隙 0. 8mm	1	2. 4	325	24 ~ 26	142	17
4. 8	I 形对接加垫、间隙 1. 6mm	1		350	24 ~ 26	122	
6. 4	60°V 形加垫、无间隙	1		375	25 ~ 27	104	
12. 7	60°V 形加垫、无间隙	2	3. 2	550	27 ~ 30	46	17
16	30°V 形加垫、间隙 3. 2 ~ 4. 8mm	第 1 层		575	31	36	
		第 2 层		600	32. 5	41	

5.7 高效高速气体保护电弧焊技术

高效高速焊接是提高焊接生产效率和实现焊接生产过程自动化的发展方向，高效高速焊接主要表现在两个方面：一是大厚度板焊接时熔敷效率的大幅提高；二是薄板焊接时焊接速度的提高。本节从高效气体保护焊和高速气体保护焊两个方面介绍几种常见的高效高速气体保护焊技术。

5.7.1 高效气体保护电弧焊技术

一般传统 MAG 焊的送丝速度不超过 8m/min，呈现传统的钟罩状喷射电弧，熔敷速度通常小于 5kg/h，在探索高效焊接的过程中其效率不能尽如人意。高效 MAG 焊其送丝速度一般超过 15m/min，熔敷速度在 8kg/h 以上，可高达 20kg/h。除传统的钟罩状喷射电弧外，高效喷射电弧的形式还有高效率短电弧、等离子型喷射电弧和旋转喷射电弧。可以采用下述气体保护焊工艺来实现高效焊：T. I. M. E 弧焊工艺；RAPID MELT 弧焊工艺；LINFAFT 弧焊工艺。

1. T. I. M. E 弧焊工艺

T. I. M. E 是 Transferred、Ionized、Molten、Energy (过渡、离子化、熔化、能量) 的英文字母缩写, 是由 Canada Weld Process 公司的 John Church 于 1980 年研究成功的一种高性能 MAG 焊接工艺。这种高性能的焊接方法首先在加拿大和日本开始应用。1990 年 6 月在维也纳焊接商贸会上, T. I. M. E. 焊工艺被首次介绍到欧洲。它采用大伸出长度和特殊的四元保护气体 (T. I. M. E. 气体中 Ar、He、CO₂、O₂ 的体积分数分别为 65%、26.5%、8%、0.5%), 通过增大送丝速度 (送丝速度高达 30m/min) 来增加焊丝熔敷效率, 在焊接质量有明显改善的同时将焊丝熔敷率提高了 2~3 倍, 达到 430g/min。

T. I. M. E 焊的工艺特点可简单地概括为: 大焊丝伸出长度、高电弧电压、大电流、高的送丝速度, 从而达到高效的结果。大焊丝伸出长度意味着提高电阻热, 采用高电弧电压、大电流的结果是提高其熔敷效率和保持焊缝宽度不会因提速而变窄, 并在大电流的 MAG 焊禁区开创了新的应用领域。试验数据表明, 同样条件下焊接以传统 MAG 的方式需 17s, 而用 T. I. M. E. 工艺焊接只需 11s。

作为一种高性能的高效 MAG 焊工艺, T. I. M. E. 焊在传统 MAG 焊工艺特点的基础上有了新的突破。它在传统 MAG 焊工艺的大电流区内开拓了新的实用领域。它通过特殊的四元混合保护气体在连续大电流区域获得稳定的熔滴过渡, 从而突破了焊接使用电流的“瓶颈”限制。它覆盖了短路过渡、喷射过渡、旋转射流等熔滴过渡形式, 利用它可以进行全位置焊接。

实现 T. I. M. E. 焊工艺需配以专用高性能恒压弧焊电源, 所采用的焊丝表面应具有极小的表面粗糙度, 以增加电导率和减小送丝波动; 送丝机功率较大, 应具备送丝速度偏差的反馈矫正功能。

T. I. M. E. 焊工艺采用富含氦气的特殊四元混合气体, 北美和欧洲是世界上天然氦气的主要产地, 氦气成本相对较低, 而我国天然氦气资源严重缺乏, 因此成本很高。此外, 对四元混合气体的配比精度要求很高, 需要专用设备进行混合均匀, 成本也相应提高。

2. RAPID MELT 弧焊工艺

由瑞典 AGA 公司开发的 RAPID MELT (快速熔融) 弧焊工艺可以提高熔敷效率, 从而实现高效焊。这种方法所用的实心焊丝直径为 1.0mm 及 1.2mm, 平焊时, 熔敷效率稍高于 20kg/h, 且焊缝尺寸较大, 可焊接板的厚度达到 20mm。这种弧焊方法的电弧形态与 T. I. M. E. 方法的电弧形态一样, 也是喷射电弧, 二者主要区别在于使用的保护气体不同。对于 RAPID MELT 电弧类型来说, 保护气体为 Ar92% + CO₂8% (体积分数)。气体流量高于普通的气体流量, 通常为 20~130L/min。焊接过程中, 焊丝伸出长度较长, 送丝系统中焊丝矫正机构可以提高焊枪定位的准确性。焊接电流不小于 600A, 弧焊电源外特性为陡降特性。

3. LINFAFT 弧焊工艺

LINFAFT 弧焊工艺由德国 LINDE 公司推出, 它与 T. I. M. E. 弧焊方法相似, 都是通过优化保护气体成分来改变电弧的物理特性, 实现稳定的旋转射流过程, 从而达到提高焊接熔敷效率、改善焊接质量的目的。

LINFAFT 的基本思想建立在通过慎重添加活性气体 CO₂ 和 O₂, 使电弧类型得到控制, 用户要求能得到满足的基础上, 根据不同的送丝速度及所需的电弧类型, 选择不同的保护气体。通过结合不同的焊接参数及选择合适的保护气体, 可以提高焊接效率, 获得良好的焊缝成形。例如, 在较低的送丝速度范围 (15~20m/min) 区间内, 可采用 Ar + CO₂8%~18% (体积分数, 下同) 气体, 如果为了提高焊缝的熔深, 则可加入 20%~30% 的氦气。当送丝速度超过 20m/min 时, 可采用 CORGON® He30 (CO₂10% + He 30% + Ar 60%) 和 CORGON® He25 (O₂3.1% + He 25% + Ar 71.9%), 其中 CORGON® He30 (CO₂10% + He 30% + Ar 60%) 含较高的 CO₂, 在送丝速度高达 27m/min 的情况下也能可靠地控制喷射过渡电弧。

5.7.2 高速气体保护电弧焊技术

传统气体保护电弧焊的焊接速度一般在 $0.3 \sim 0.5 \text{ m/min}$ 之间, 提高焊接速度后, 会产生咬边、未熔合等焊接缺陷, 甚至出现驼峰焊道, 使得焊缝的成形很差, 无法投入实际使用。然而, 对于薄板焊接来说, 提高焊接速度是提高焊接生产率的关键环节之一, 特别是在弧焊机械化、自动化、弧焊机器人的应用越来越多的情况下, 提高焊接速度更是充分发挥其优势, 挖掘生产潜力的关键环节。通常认为, 焊接速度在 1 m/min 以上可认为是高速焊接。

1. 单丝高速气体保护电弧焊技术

20 世纪 90 年代初期, 瑞典 AGA 公司开发的 RAPID ARC (快速电弧) 焊接工艺证实了改变保护气体成分对于提高薄板焊接速度具有一定的作用。其主要思想是采用实心焊丝进行单丝高速焊接, 焊接过程中采用强制短弧及高效的喷射电弧。该工艺专门用于焊接薄板, 采用高速送丝、大伸出长度和低氧化性保护气体 MISON8 (该公司的专利产品), 增强了熔池的润湿性, 因而焊缝与母材过渡平滑, 并且焊缝平整, 可在 $1 \sim 2 \text{ m/min}$ 的速度下进行焊接而不会出现成形缺陷, 比传统的 MIG/MAG 焊接速度提高 $2 \sim 3$ 倍。通过合理匹配送丝速度、电弧电压、保护气体和焊丝伸出长度等焊接参数, RAPID ARC 焊接工艺可实现不同的熔滴过渡形式。目前这种焊接方法已经成功地在欧洲市场上得到了推广。

华南理工大学黄石生教授团队与中集集团、广州同诚焊接设备技术有限公司联合开发的高效节能 NBJ—500/630 型逆变式集装箱 MAG 焊机, 改善输出波形, 取代进口的晶闸管整流式 MAG 焊机, 不仅焊接速度可达到 $1 \sim 1.2 \text{ m/min}$ (用新的自动行走操作机施焊, 达到 1.5 m/min 以上), 而且节电 $20\% \sim 30\%$, 每天工作近 24h, 可靠性高。

2. 双丝高速气体保护电弧焊技术

双丝 (多丝) 焊最早于 1948 年出现在埋弧焊工艺中, 而且很快就提高了弧焊生产率, 现在双丝埋弧焊法已经在国内外实际生产中得到了广泛的应用, 但是由于埋弧焊熔池不可见, 加上只适于平焊位置, 所以这种双丝焊方法有较多限制。熔化极气体保护双弧焊接方法的应用最早出现在 1955 年, 但由于当时弧焊电源技术的落后, 限制了其发展。现在由于 GMAW 方法具有高效、节能、价廉、便于使用、自动化程度高等优点, 在国际上已成为主要弧焊方法。近年来, 德国、奥地利、日本、美国等国家的一些弧焊设备厂商在多丝焊 (两根或多根焊丝配以单个或多个电源) 方面进行了不少研究工作, 在提高焊接速度方面取得了一些实用化的成果。为了提高焊接速度和熔敷效率, 近年来国外研制和生产了双丝脉冲 MIG 高速焊装备。2005 年 9 月在德国埃森市举行的第 16 届埃森国际焊接与切割展览会上, 国内外有多家厂商展出了双丝脉冲 MIG 高速焊设备, 是该展览会上的一大亮点。从双丝弧焊工艺的角度来看, 目前双丝脉冲 MIG 焊主要有两种形式, 一种是 TWIN ARC, 另一种是 TANDEM, 分别如图 1-5-50a、b 所示。

TWIN ARC 双丝弧焊系统采用两台完全相同的弧焊电源 (也可以使用一个电源), 两套送丝机构, 两根焊丝共用一个导电嘴 (显然两根焊丝之间不是绝缘的) 和一个喷嘴, 双电弧共熔池。为了防止双电弧相互干扰, 常采用脉冲 MIG 焊法, 并保持两个电弧轮流交替燃烧, 由于两个电弧轮流交替燃烧其熔敷速度的提高是依靠提高焊接电流, 当焊接电流过大时可能会产生一系列的不利影响。两焊丝具有相同的电压, 主要适用于碳钢的焊接。TWIN ARC 系统的优点是两个弧焊电源之间无需协同控制, 系统相对简单, 两个电弧同电位, 电弧的稳定完全靠自身的调节作用。但是其缺点很明显, 电弧的控制性差, 电弧间的干扰较大, 很难对两个电弧及熔滴过渡进行精确控制, 由于两根焊丝共用导电嘴无法对两个电弧分别控制, 假如一根焊丝发生短路, 则短路的焊丝将会发生爆断而引起另一根焊丝熄弧。这种方法的焊接参数十分难调, 但由于使用同一个导电嘴, 焊接操作十分方便。其主要生产厂家有美国 Miller, 德国 SKS、Binzel 和 Nimark 等。

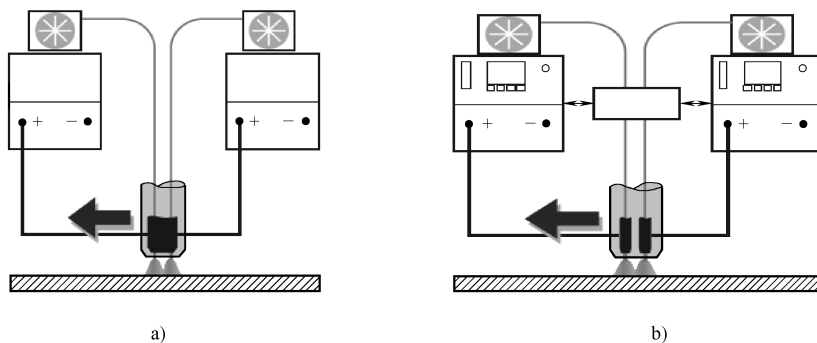


图 1-5-50 TWIN ARC 和 TANDEM 弧焊系统原理图

a) TWIN ARC 焊系统原理图 b) TANDEM 弧焊系统原理图

TANDEM 双丝弧焊系统与 TWIN ARC 系统组成基本相同，也是采用两台完全相同的脉冲弧焊电源，两套送丝机构，不同的是采用两个相互绝缘的导电嘴，两个电源之间还有协同控制。TANDEM 系统可以使两台弧焊电源分别设置不同的参数，相互间可以协同控制，这样就大大减小了双丝焊接过程中双电弧之间的相互干扰，可与自动化控制专机或焊接机器人配套使用。TANDEM 双丝焊的焊接参数好调整，使用方便，已被用户所接受。TANDEM 双丝焊可应用于碳钢、低合金钢、不锈钢、铝合金等各种金属材料的焊接，适用于各种接头形式。采用 TANDEM 方式的还有德国 CLOOS、奥地利 Fronius、美国 Lincoln 和法国 SAF 等公司。一般认为 TANDEM 方式比 TWIN ARC 方式有更多的优点。迄今为止，TANDEM 双丝焊技术已经成为最成熟的高效焊接方法，用于焊接碳钢、不锈钢、铝合金以及其他金属材料，得到了广泛的应用。随着焊接自动化程度的普及，TANDEM 双丝焊技术具有更广阔的应用前景。

CLOOS 公司开发的适用于中厚板的 TANDEM 高速双丝弧焊装备，将两根焊丝按一定的角度放在一个特别设计的焊枪里，两根焊丝分别由各自的弧焊电源供电，焊接参数（如焊丝材质、直径、是否加脉冲、脉冲频率等）都可彼此独立设定，输出的两路脉冲电流波形的相位差也可根据焊接情况而灵活设定。两台 500A 电源组成的双丝弧焊系统，送丝速度达 30m/min，焊接速度可达 6m/min。

Fronius 公司的脉冲 MIG 双丝弧焊装备，也采用两套弧焊电源和送丝系统，焊接参数分别控制，但是两个弧焊电源的脉冲频率必须保证相同，脉冲电流的相位总是相差 180°。该装备采用了先进的全数字化逆变式弧焊电源，只要参数调节合适就能获得较好的焊接质量，并且两根焊丝的熔滴是交替进行一脉一滴过渡到熔池的，采用该装备用直径 1.2mm 焊丝焊接 2.3mm 厚铝板时的焊接速度可以达到 2m/min。

国内也有不少高等院校和科研单位研发了不同特点的双丝高速弧焊系统。华南理工大学黄石生教授团队研发成功 NBM—630/500 和 NBM—1250/1000 型 IGBT 逆变式双丝高速 MAG/MIG 弧焊系统，分别对厚 4~6mm 的低合金钢和铝合金板实现焊接速度 2~3.5m/min。两台 IGBT 式弧焊逆变器的两路脉冲电流以输出同步、交替和随机三种相位关系，均可实现稳定的焊接过程，焊缝成形良好。双丝电弧脉冲同步和随机相位关系熔滴过渡过程高速摄影，如图 1-5-51 所示。

双丝高速弧焊系统，特别是 TANDEM 系统应用的领域较为广泛，如汽车及汽车零部件制造、造船业、锅炉及压力容器、钢结构制造、铁路机车车辆制造等，它不仅能够焊接碳钢、不锈钢，还可用于焊接铝合金，效果较好。

3. 多丝高速气体保护电弧焊技术

传统的弧焊工艺一般采用单弧焊电源供电或单焊丝的方式。近年来，日本、瑞士、德国等在多



图 1-5-51 双丝电弧脉冲同步和随机相位关系熔滴过渡过程高速摄影图

a) 双电弧脉冲同步相位关系熔滴过渡过程高速摄影

b) 双电弧脉冲随机 (114Hz 和 105Hz) 时熔滴过渡过程高速摄影

根焊丝配以单个或多个弧焊电源进行焊接方面,开展了大量的研究工作,在提高焊接生产速度和金属熔敷率方面取得了一些实用化的成果。

日本的藤村告史开发的多丝弧焊系统采用同一个焊枪同时输送多条焊丝,各焊丝之间相互绝缘。弧焊电源方面若各焊丝分别采用隔离的,则设备投入过大,且应用不便。如采用同一弧焊电源供电,则会带来新问题,一是如果弧焊电源和送丝系统不够稳定,则各电弧的电流和电压会不等,这样可能会造成电弧失去自调节能力。另外,各焊丝上燃烧的电弧之间存在强烈的电磁力,会造成电弧不稳,飞溅大,焊缝成形不好,失去多丝焊意义。为解决这一问题,采用电流相位控制的脉冲弧焊电源,电弧在三根焊丝上轮流燃烧,在保证电弧挺度的同时,通过调节各焊丝之间的位置关系及其焊接方向的夹角,来改变能量分布,使焊接过程稳定,从而减少咬边和驼峰等成形缺陷的倾向。该方法可用于角焊缝的高速焊接,焊接速度可以达到 $1.8\text{m}/\text{min}$,取得了一定的效果,但该工艺使用三根焊丝,弧焊设备比较复杂,价格昂贵,对操作者和环境条件要求高,推广困难较大,没能得到广泛的应用。为此,国内外根据双丝提高热效率和高速的原理,研制了简易、可靠、近等效的组合式多电弧气体保护焊高速系统。如华南理工大学(黄石生教授团队)与广州龙穴造船厂、广州同诚焊接设备技术有限公司联合,成功开发了由4台1000A 逆变式高速气体保护电弧焊系统组

成的双边双弧焊机组，取代进口双边双弧焊系统，用于全国三大造船基地之一“广州龙穴造船厂”的长 20m、厚 20~45mm 的大型 T 排高速焊生产线（见图 1-5-52a）。通过提高功率，优化双弧间距和夹角及其焊接参数匹配等工艺措施，实现一次成形，焊接速度高达 1.8m/min 以上，成形美观（图 1-5-52b、c 分别为 T 排左、右边角焊缝）、变形小、成品率高、焊后修补纠正变形量小、节能、价格低，同时采用 T 排自动对中装配技术和合理调整流水线工序，产量大大提高。从每班焊 7~8 个 T 排，提高到 20~28 个。

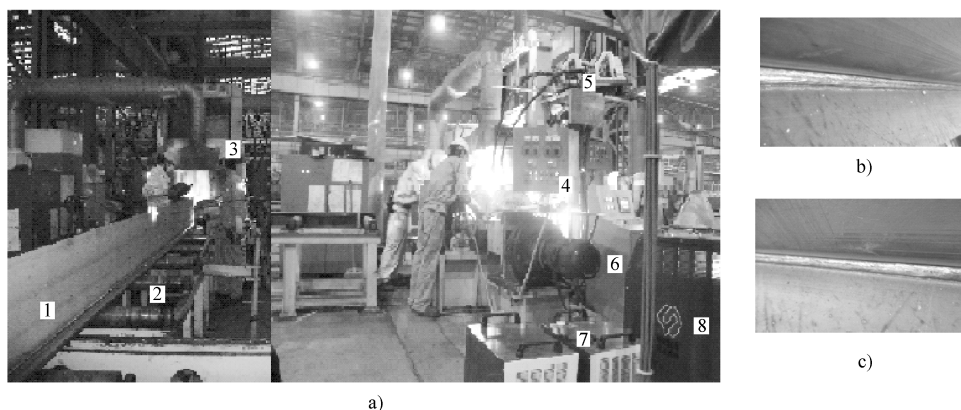


图 1-5-52 NB—1000A×4 逆变式双面双弧气体保护高速焊接系统在 T 排生产线应用现场
1—T 排（长 18m、厚 12~50mm） 2—输送带（60m） 3—T 排对中定位装配、压紧与进给机构 4—焊接操作盒（4 个每边两个） 5—送丝机（带焊枪，4 台每边两台） 6—4 组焊接参数 自动对中装配、传输、弧焊控制中心 7—焊枪循环冷却箱（4 个） 8—NB-1000A 逆变式弧焊电源（4 台）

参考文献

- [1] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册：第 1 卷 [M]. 北京：机械工业出版社，2008.
- [2] Klasweman. MIG 焊指南 [M]. 李国栋，栗卓新，译. 北京：机械工业出版社，2009.
- [3] 李亚江，刘强，王娟等. 气体保护焊工艺及应用 [M]. 北京：化学工业出版社，2009.
- [4] 韩明. 焊接工艺理论与技术 [M]. 北京：机械工业出版社，2008.
- [5] 傅积和，孙玉林. 焊接数据资料手册 [M]. 北京：机械工业出版社，1994.
- [6] 中国机械工程学会焊接学会，中国焊接协会，机械工业部哈尔滨焊接研究所. 焊工手册 [M]. 北京：机械工业出版社，1998.
- [7] 全国焊接标准化技术委员会. GB/T 8110—2008 气体保护焊用碳钢、低合金钢焊丝 [S]. 北京：中国标准出版社，2008.
- [8] 全国钢标准化技术委员会. YB/T 5092—2005 焊接用不锈钢焊丝 [S]. 北京：冶金工业出版社，2005.
- [9] 全国焊接标准化技术委员会. GB/T 10858—2008 铝及铝合金焊丝 [S]. 北京：中国标准出版社，2008.
- [10] 全国焊接标准化技术委员会. GB/T 9460—2008 铜及铜合金焊丝 [S]. 北京：中国标准出版社，2008.
- [11] 全国焊接标准化技术委员会. GB/T 15620—2008 镍及镍合金焊丝 [S]. 北京：中国标准出版社，2008.
- [12] 李恒，李俊岳，杨立军，等. CO₂ 气体保护焊短路过渡过程的闭环实时控制 [J]. 焊接学报，2001，22（1）：27-30.
- [13] 徐孝福，王威，王旭友，等. 熔化焊接过程中熔滴短路过渡的研究进展 [J]. 焊接，2008（3）：

53-56.

- [14] 朱志明. 熔化极气体保护焊熔滴过渡控制的发展现状及关键技术 [J]. 电焊机, 2004 增刊: 69-77.
- [15] 何宽芳, 黄石生. 脉冲 MAG 焊过程控制的现状和发展趋势 [J]. 电焊机, 2008, 38 (2): 33-36.
- [16] 俞建荣, 龚永飞, 蒋力培, 等. CO₂ 焊的波形控制技术的研究进展 [J]. 北京石油化工学院学报. 2007, 15 (3): 43-46.
- [17] 齐化冰, 陈建平, 王继春, 等. STT 根焊在西气东输二线管道焊接工程的应用 [J]. 电焊机, 2009, 39 (5): 104-106.
- [18] 缪羽祥, 李恒, 靳红星, 等. STT 焊接技术在俄罗斯远东管道的应用 [J]. 油气储运, 2009, 28 (8): 42-45.
- [19] 杨修荣. 超薄板 MIG/MAG 焊——CMT 冷金属过渡技术 [J]. 电焊机, 2006, 36 (6): 5-7.
- [20] 马晓丽, 华学明, 沈甘迪, 等. 高效弧焊设备与方法在船舶制造中的应用现状 [J]. 焊接技术, 2008, 37 (1): 1-5.
- [21] 陈裕川. 高效 MAG 焊的新发展 (上) [J]. 机械工人 (热加工), 2001 (11): 3-5.
- [22] Knapp I, Bartosik M. An investigation of the T. I. M. E. welding method [J]. Welding International, 1998, 12 (1): 25-28.
- [23] Stefan, Trube. LINFAS[®] 概念的高速 MAG 焊 [J]. 包晔峰, 译. 国外机车车辆工艺, 2001 (4): 1-5.
- [24] 陈强, 孙振国. 弧焊技术发展现状 [C]. 高效化焊接国际论坛论文集. 北京: 中国机械工程学会, 2002.
- [25] 殷树言, 卢振洋, 黄鹏飞, 等. 高效化焊接原理与特征 [C]. 高效化焊接国际论坛论文集. 北京: 中国机械工程学会, 2002.
- [26] Olsson, R, Stemvers M, Staers I. High-speed welding gives a competitive edge [J]. Welding review international, 1995, 14 (8): 128-131.
- [27] ASHTON T. Twin-arc submerged arc welding [J]. Welding Journal, 1954, 33 (4): 350-355.
- [28] Volodin V S, Sluchanko NA. Automatic welding with two electrodes [J]. Welding Journal, 1955 (3): 103-111.
- [29] 殷树言, 刘嘉, 陈树君. 2005 年埃森焊接展览会观感 [J]. 焊接技术, 2006, 35 (S1): 4-6.
- [30] Janez T. Mathematical modeling of melting rate in twin-wire welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 100 (1): 250-256.
- [31] Michie K, Blackman S, Ogunbiyi T E B. Twin-wire GMAW: Process characteristics and applications [J]. Welding Journal, 1999, 78 (5): 31-34.
- [32] Gerd Trommer. Tandem wire process improves ship panel production: High deposition rates and low heat input are among the benefits of using two separately controlled arcs [J]. WeldingJournal, 2009, 88 (9): 42-44.
- [33] TSUYAMA Tadahisa. Study of thick corner joint high efficiency application method using Tandem electrogas arc welding: The Establishment of Normal Application Condition [J]. Japan Welding Society, 2008, 82 (4): 40-41.
- [34] Nadzam J. Tandem GMAW offers quality weld deposits, high travel speeds [J]. Welding Design and Fabrication, 2003, 76 (11): 28-31.
- [35] Dipling L A, Michael S, Ludwig B, et al. High-quality and economically viable coating by means of tandem gas-shielded metal-arc welding [J]. Welding and Cutting, 2002, 54 (5): 18-23.
- [36] McConnell L. Lifting productivity using TANDEM wire welding [J]. Welding & Metal Fabrication, 2000, 68 (2): 16-18.
- [37] 魏占静. 德国 CLOOS TANDEM 高速 MIG/MAG 双丝焊技术 [J]. 现代焊接, 2006 (5): 53.
- [38] 明珠, 马新沛, 王克鸿, 等. 厚板铝合金双丝气体保护焊工艺 [J]. 焊接, 2004 (10): 25-28.
- [39] 藤村告史. 高速ア-ク溶接法の開発 [J]. 溶接技術, 1990, 38 (2): 74-85.

-
- [40] 李远波. 软开关逆变式双丝高速脉冲 MAG 焊装备及其数字化协同控制计数研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2004 (5).
- [41] 文元美, 黄石生, 吴开源, 等. 双丝脉冲 MAG 焊两种电流相位关系的焊接行为比较 [J]. 焊接学报, 2010, 31 (01): 59-62.
- [42] 黄石生, 文元美, 薛家祥, 等. 弧焊熔滴过渡的高速摄像与电信号测试分析 [J]. 华南理工大学学报 2008, 36 (4): 2-5.

第 6 章 钨极惰性气体保护焊

钨极惰性气体保护焊是使用纯钨极或活化钨（常用钍钨、铈钨等）作为非熔化电极，使用惰性气体（如氩气、氦气或它们的混合气体等）作为保护气体，利用电极与母材金属之间产生的电弧热熔化母材和填充焊丝（也可以不填充焊丝）的电弧焊方法，简称为 GTAW（Gas Tungsten Arc Welding）或 TIG（Tungsten Inert Gas Arc Welding）焊。本章重点介绍 TIG 焊的原理、工艺方法特点及其弧焊电源、辅助设备、钨极、保护气体的选配，还简介了其技术方法的新发展。

6.1 TIG 焊原理及特点

6.1.1 TIG 焊的工作原理

TIG 焊工作原理示意图如图 1-6-1 所示。焊接时，钨极通过电极夹固定，从焊枪喷嘴中伸出一定距离，钨极端部与焊件之间形成电弧，使金属熔化从而形成焊缝。钨具有熔点高（约为 3380°C ）、热导率高、热膨胀系数小的特点。钨在高温下强度高而热应力小，具有良好的高温使用性能，可长时间在高温状态下工作，维持了恒定的电弧长度，保持焊接电流不变。与此同时，惰性气体以一定的流量从焊枪的喷嘴中连续喷出，在电弧周围形成气罩隔绝空气，以保护钨极、熔池及其邻近热影响区免受大气中氧、氮等的有害作用。惰性气体也称作非活性气体，具有不与其他物质发生化学反应和不溶于金属的性质。用于 TIG 焊的惰性保护气体通常有氩气，有时也用氦气或氩与氦的混合气体。氩气是由空气分离获得，氦气是由天然气提取而获得，氩气的成本相对较低，在生产中使用较多。

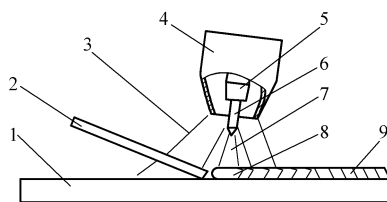


图 1-6-1 TIG 焊工作原理示意图

1—焊件 2—填充焊丝 3—惰性气体 4—喷嘴
5—电极夹 6—钨极 7—电弧 8—熔池 9—焊缝

TIG 焊时，根据焊件坡口形式及接头性能的需要，可以填充焊丝也可以不填充焊丝。

不加填充焊丝时，利用焊件被焊部位自身熔化形成焊缝。填充焊丝时，可以从电弧的前方把焊丝以手动或自动的方式，按一定的速度向电弧中送进。焊丝熔化后进入熔池，与焊件熔化金属一起冷却凝固形成焊缝。

6.1.2 TIG 焊的特点

1. 优点

1) 惰性气体（氩气、氦气）保护效果好。它本身不溶于金属，也不与金属反应，能有效隔绝周围空气，防止空气中的氧、氮、氢等气体对焊接金属的污染。焊后无需去除焊渣，因此，能够实现高品质焊接，得到优良的焊缝。

2) TIG 焊电弧十分稳定，在很小的电流下（ $<10\text{A}$ ）仍可正常焊接，适用于打底焊、薄板焊接。脉冲 TIG 焊接时，特别适用于对热敏感材料的焊接。

3) 填充焊丝不通过产生电弧的焊接电流，焊接时不会产生飞溅，焊缝成形美观。

4) 使用直流反接和交流时，电弧具有清除氧化膜的能力，特别是方波交流氩弧具有电弧稳

定、清除氧化膜功能好的特点,有利于易氧化的铝、镁及其合金的焊接。

5) 热源和填充焊丝可分别控制,能够很好地控制热输入,有利于进行全位置焊接和实现单面焊双面成形的焊接工艺。

2. 缺点

1) 钨极承载电流的能力有限,TIG 焊的熔深浅,熔敷速度小,生产效率较低。

2) 过大的电流会引起钨极熔化和蒸发,其微粒有可能进入熔池,造成焊缝夹钨,影响焊缝质量。

3) TIG 焊无冶金脱氧、脱氢作用,焊前对工件表面的油、水、锈蚀等脏物的清理要求较高,否则会出现气孔等缺陷影响焊接质量。

4) 与焊条电弧焊、埋弧焊、CO₂ 焊等电弧焊方法比较,氩气、氦气价格较高,生产成本低。

6.1.3 TIG 焊的应用

TIG 焊通常被用于焊接厚度在 6mm 以下的焊件。但从生产效率考虑以 3mm 以下为宜。脉冲 TIG 焊还可用于焊接 0.8mm 以下的薄板,特别适用于全位置管道对接焊。TIG 焊可以采用手工焊也可采用自动焊,对于某些厚壁重要构件(如压力容器及管道),在根部熔透焊道焊接(打底焊)、全位置焊和窄间隙焊时,为了保证高焊接质量,有时也采用 TIG 焊。由于没有飞溅,TIG 焊也被用于电力变压器线圈铜或铝导体的焊接。TIG 焊可以用于几乎所有金属和合金的焊接。特别是对铝、镁、铜等有色金属及其合金、不锈钢、耐热钢、高温合金和钼、铌、锆等难熔金属的焊接最具优势。但对于低熔点和易蒸发的金属(如铅、锡、锌),焊接较困难。

目前,TIG 焊已广泛应用于航空航天、核能、化工、压力容器、电气、医疗器械、金属家具、炊饮器具等设备制造工业部门。

6.2 TIG 焊设备配置

6.2.1 TIG 焊设备组成

手工 TIG 焊设备通常由弧焊电源、焊枪、引弧和稳弧装置、供气系统、焊接程序控制装置和水冷系统(采用大电流水冷式焊枪时用)等部分组成。在现代生产的 TIG 焊设备中,引弧和稳弧装置以及焊接程序控制装置已经和弧焊电源合为一体。如图 1-6-2 所示为手工 TIG 焊设备组成示意图。

自动 TIG 焊设备是在手工 TIG 焊设备基础上,增加了焊接小车行走机构。如果需要填充焊丝,则还包括一个送丝机构。有时还包括轨迹跟踪装置和电弧摆动装置等。焊枪和送丝机构安装在小车行走机构上,焊枪可以升降、前后移动以及根据焊缝接头形式进行姿态调整。自动 TIG 焊焊枪和送丝机构示意图如图 1-6-3 所示。

专用自动 TIG 焊机是根据待焊产品结构、尺寸大小、焊缝接头形式和装夹方式等焊接工艺要求而专门设计和制造的专用焊接设备。其特点是适合结构相似焊件的大批量焊接生产,如管子和管板孔口环缝自动 TIG 焊机、变压器箔式线圈铜箔和铜导电排直缝专用 TIG 焊机等。对于多品种小批量

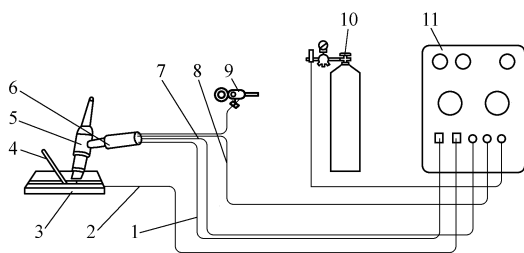


图 1-6-2 手工 TIG 焊设备组成示意图

1—电极电缆 2—工件电缆 3—焊件 4—填充焊丝
5—焊枪 6—开关 7—开关线 8—保护气管 9—冷却水系统 10—气瓶 11—弧焊电源及控制系统

焊件生产，可以采用自动化程度更高的弧焊机器人进行 TIG 焊接。图 1-6-4 所示为变压器箔式线圈铜箔和铜导电排直缝专用 TIG 焊机，该设备采用华南理工大学黄石生教授团队利用自主研发的专利技术，与顺特电气设备有限公司、广州市同诚焊接设备技术有限公司联合开发生产的 WSME—1250/1000 型逆变式交流方波 TIG 焊电源和廉价氩气保护焊工艺，取代用两台进口的 500A 晶闸管式直流弧焊电源并联使用和昂贵氦气保护 TIG 焊工艺，以较高的同等速度（600 ~ 800mm/min）进行变压器箔式线圈铝/铜箔（厚 1 ~ 2mm）和铝/铜导电排（厚 15 ~ 18mm）优质搭接焊接，大幅度降低生产成本，节能 20% ~ 30%。

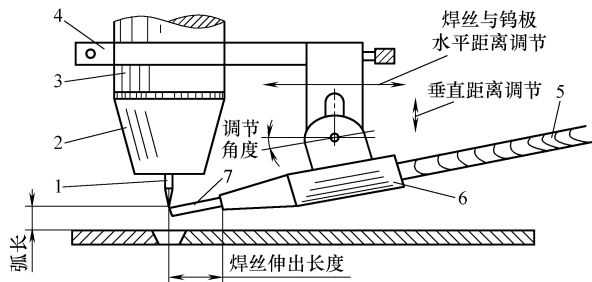


图 1-6-3 自动 TIG 焊焊枪和送丝机构示意图
1—钨极 2—喷嘴 3—焊枪 4—调节机构
5—送丝软管 6—导丝嘴 7—焊丝

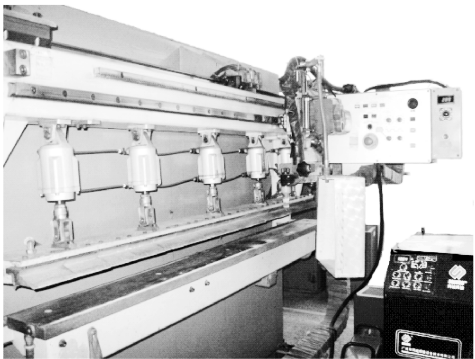


图 1-6-4 变压器箔式线圈铜箔和铜导电排直缝专用 TIG 焊机

6.2.2 TIG 焊弧焊电源选配原则

TIG 焊根据焊件材料可选择直流或交流弧焊电源，表 1-6-1 为不同的焊件材料与弧焊电源类别和极性的选择关系。

表 1-6-1 不同的焊件材料与弧焊电源类别和极性的选择关系

材 料	直流		交流
	正接法	反接法	
铝(厚 2.4mm 以下)	×	○	△
铝(厚 2.4mm 以上)	×	×	△
铝青铜、铍青铜	×	○	△
铸铝	×	×	△
黄铜、铜基合金	△	×	○
铸铁	△	×	○
异种金属	△	×	○
无氧铜、硅青铜	△	×	×
堆焊	○	×	△
高碳钢、低碳钢、低合金钢	△	×	○
镁(厚 3mm 以下)	×	○	△
镁(厚 3mm 以上)	×	×	△
镁铸件	×	○	△
高合金、镍及镍合金、不锈钢	△	×	○
钛	△	×	○
银	△	×	○

注：△最佳；○良好；×最差。

从表 1-6-1 可以看出,焊接铝、镁及其合金时应优先选择交流弧焊电源,对于薄件也可选用直流反接法。焊接其他金属一般优先选择直流正接法,其次为交流弧焊电源。

1. 直流弧焊电源

(1) 直流正接法 采用直流正接法时焊件与弧焊电源的正极相连,钨极与弧焊电源的负极相连。直流 TIG 焊多采用直流正接法方式施焊,此时电流不发生极性变化,电弧一旦引燃就能够十分稳定地燃烧。它是所有电弧焊方法中电弧过程最为稳定的焊接方法之一。电弧燃烧时,钨极为阴极,具有强大的热电子发射能力,发射大量的电子流,从弧柱向工件运动,正离子流向钨极运动。在发射电子的同时,这些具有高能量的电子以汽化潜热形式从阴极带走一部分能量,使阴极得到冷却,钨极烧损极小。同时由于阴极斑点集中,电弧比较稳定。工件受到质量很小的电子流撞击,不能除去金属表面的氧化膜。除铝、镁及其合金外,其他金属表面不存在高熔点氧化膜问题,一般都适合采用这种焊接方法。直流正接法优点如下:

1) 熔池深而窄:焊件接正极时,焊件熔池接受电子轰击时释放的全部动能和位能(逸出功),产生大量热量。电弧比较集中,阳极加热面积比较小,因而得到熔池深而窄的焊缝,焊件收缩应力和变形小,生产效率也较高。

2) 钨极寿命长:钨极是很好的热阴极材料,在高温时具有很强的热电子发射能力,钨极接负极时,发射电子能力强,在其发射电子时需要付出大量的逸出功,对钨极具有很强的冷却作用;同时钨极接受正离子轰击时得到的能量比较小,因而钨极上产生的热量比较少,不易过热烧损,寿命较长。

3) 电弧稳定:根据电弧理论,电弧中阴极发射电子的稳定性对电弧的稳定性影响最大。钨极的热发射能力很强,当采用小直径钨极时,电流密度可以增大,有利于电弧稳定,即使在小电流下电弧也能稳定燃烧。

(2) 直流反接法 采用直流反接法时工件与弧焊电源的负极相连,钨极与电源的正极相连。直流反接 TIG 焊在生产实际中很少使用,只用于厚约 3mm 以下的铝、镁及其合金焊接。原因是钨极易过热,烧损快、焊缝熔深浅,电弧不够稳定。但直流反接时电弧对母材表面的氧化膜具有“阴极清理”作用,这种作用也称为“阴极破碎”或“阴极雾化”作用。它是铝、镁及其合金焊接的重要影响因素。

1) 阴极清理作用:直流反接法焊接时母材作为阴极承担发射电子的任务。母材表面有氧化膜的地方电子逸出功比其纯金属要小许多,更容易发射出电子,因此电弧有自动寻找金属氧化膜的性质,在氧化膜上容易形成电弧的阴极斑点。阴极斑点的形成则构成了带正电荷的氩离子的撞击条件。而氩的相对原子质量较大(约为 40),在电弧中向阴极运动的氩离子具有较大的动能。这样的氩离子轰击在带有氧化膜的阴极斑点上,就使致密难熔的氧化膜发生物理性的破碎现象,在阴极表面呈现雾化的状态,最终将氧化膜清理干净。

铝、镁及其合金的表面存在一层致密的氧化膜,由于氧化膜熔点很高,如 Al_2O_3 熔点为 2050°C ,比纯铝的熔点 657°C 高出许多。焊接时氧化膜难以熔化,往往覆盖在焊接熔池表面上,如不及时清除,冷却凝固后会造成本熔合,使焊缝表面形成皱皮或内部产生气孔、夹杂等缺陷,直接影响焊缝质量。采用直流反接焊接铝、镁及其合金,利用上述对氧化膜的阴极清理作用,可以获得表面光亮美观、成形良好的焊缝。

2) 钨极易过热和寿命短:反接时钨极是电弧的阳极,不具有发射电子的作用,而是接受大量电子及其携带的大量能量,因而钨极易产生过热,甚至熔化。在钨极直径相同的情况下,钨极为阳极时的许用电流仅为阴极时的 $1/10$ 左右。对于同一焊接电流值,例如焊接电流为 125A,作为阳极时为了不使钨极熔化,直径需要达到 6mm;而作为阴极时选用直径 1.6mm 的钨极即可。

3) 焊缝浅而宽:焊件为阴极,电弧的阴极弧根总是在不断高速游荡,自动寻找金属氧化膜,

使得电弧分散, 加热不集中, 因而得到浅而宽的焊缝, 生产效率低。

2. 交流弧焊电源

在生产中焊接铝、镁及其合金时一般都采用交流电。这是因为交流电的极性是在周期性地变换, 在每个周期里半波为直流正接, 半波为直流反接, 正接的半波期间钨极可以得到冷却, 并能发射足够的电子以利于电弧稳定。反接的半波期间工件表面氧化膜被去除而获得表面光亮、成形良好的焊缝。实践证明, 采用交流电弧能够两者兼顾, 适合焊接铝、镁及其合金。

但是, 交流电源也有不足之处: 一是会产生有害的直流分量, 必须予以消除; 二是在 50Hz 频率下交流电流每秒钟经过零点 100 次, 必须采取稳弧措施。

直流分量产生的原因是: 在普通交流电源的情况下, 由于电极和工件的电性能、热物理性能以及几何尺寸等方面存在的差异, 造成交流电在两半周中的弧柱电导率、电场强度和电弧电压不对称, 致使电弧电流也不对称, 产生了部分整流作用, 结果使交变的电流不平衡, 出现了所谓“直流分量”。

焊接铝、镁及其合金时, 图 1-6-5 是交流钨极氩弧焊的电流、电压波形及其直流分量示意图。正极性半周时, 钨极发射电子, 电弧稳定性好, 只需要很低的电压就能维持电弧的燃烧, 因此电弧电压 u_f 较低, 正半周重新引弧电压 u_{yh1} 较低, 电流较大, 通电时间较长。而在负极性半周时, 工件发射电子的能力远不如钨极, 因此阴极压降大, 电弧电压 u_f 较大, 电流较小, 负半周重新引弧电压 u_{yh2} 较高, 且通电时间较短。焊接电流的波形出现了不平衡。相当于在一个不平衡的交流电流上再叠加了一个直流分量 I_{DC} 。

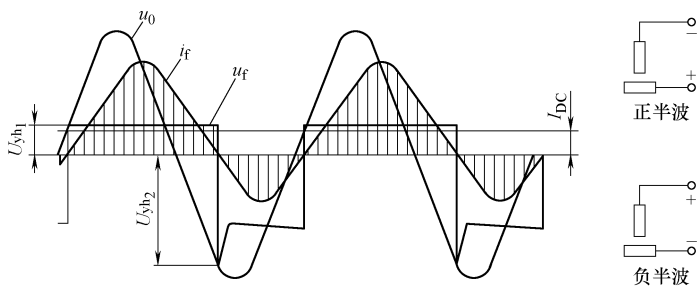


图 1-6-5 交流钨极氩弧焊的电流、电压波形及其直流分量示意图
 u_0 —电源电压 i_f —焊接电流 u_f —电弧电压 U_{yh1} —正半周重新引弧电压
 U_{yh2} —负半周重新引弧电压 I_{DC} —直流分量

直流分量的现象不仅用交流 TIG 焊铝时存在, 用交流 TIG 焊铜、镁等合金时同样有这个问题。凡电极和工件材料的熔点、沸点、热导率等物理性能差别较大时都会出现。电极与母材的性能相差越远, 上述不对称现象越严重, 直流分量也越大。即使是同种材料交流焊接时, 由于电极与焊件几何形状和散热条件的差异, 也会有直流分量, 只是其直流分量数值很小, 不会影响设备正常工作而已。例如, 熔化极氩弧焊时, 焊丝和工件通常用同一种材料, 上述电流不对称的情况就不显著, 因而可以忽略直流分量。

由于直流分量的存在, 首先会使焊接变压器铁心相应产生直流磁通, 可使变压器达到磁饱和状态, 从而导致变压器励磁电流大大增加。这样, 一方面变压器的铁损和铜损增加, 效率降低, 温升提高, 甚至烧毁变压器。其次使阴极清理作用减弱, 因为直流分量使负极性半周相对缩短了, 而阴极清理作用只有在这个半周才存在。再其次会使焊接电流波形严重畸变, 使电弧不稳定, 甚至在负极性半周造成电弧熄灭。因此需采取措施来消除直流分量的有害作用。

最常见的方法是在焊接回路中串联大容量的无极性的电容器组。电容只允许交流电通过而不允许直流电通过, 因此串联电容可以起到隔离直流分量达到消除直流分量的作用。此电容也称为隔直

电容，电容量是根据最大焊接电流来确定，一般按 1A 电流需要 300 ~ 400μF 的电容量。该方法效果好、使用、维护简单，电容上仅承受电压而基本不消耗能量，所以在交流钨极氩弧焊设备中是应用最多的方法。其他消除直流分量方法还有在焊接回路中串联一直流发电机或串联蓄电池、采用电阻和二极电路等，但都不是理想的方法，生产中很少应用。经过消除直流分量的交流钨极氩弧焊，可以获得焊缝熔深良好、焊波均匀、去氧化膜好和保护可靠的效果。

另外还必须指出，由于交流电弧不如直流电弧稳定，实际应用的交流 TIG 焊机还需配备引弧装置和稳弧装置，将在 6.2.3 节中予以详述。

3. 交流方波（矩形波）弧焊电源

交流方波（矩形波）TIG 焊与普通交流 TIG 焊相比，一方面能有效改善普通交流电弧的稳定性，另一方面能合理分配钨极与焊件之间的热量，在保证阴极清理条件下，交流方波 TIG 焊能最大限度地减少钨极烧损，并获得满意的熔深。交流方波的焊接电流两半波参数可调，可以不对称。焊接时的电流波形如图 1-6-6 所示。占空比 K 表示负极半周（焊件为阴极）通电时间的比例， K 用下式计算：

$$K = t_n / (t_n + t_p) \times 100\%$$

式中 t_n ——周期中负极性半周时间；
 t_p ——周期中正极性半周时间。

K 有时也称为反转比，当其增大时，阴极清理作用加强，但熔深变得较浅，熔宽加大，钨极烧损加快；反之， K 减小时，阴极清理作用减弱，而熔深变得深而窄，钨极烧损显著下降，对两极热量分配有利。通常是选择最小而必要的反极性时间以去除氧化膜，用余下的正极性时间加速母材的熔化，使焊接处于最佳状态。一般 K 可在 10% ~ 50% 范围内调节。

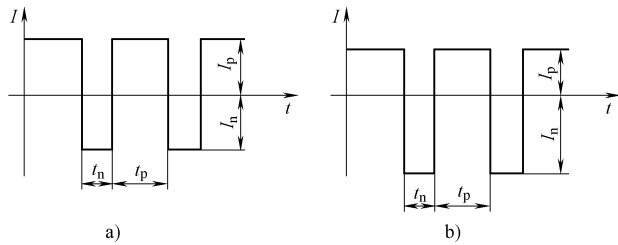


图 1-6-6 交流方波钨极氩弧焊电流波形

a) 方波变脉宽 b) 方波变极性

t_n —负半波时间 I_n —负半波电流 t_p —正半波时间 I_p —正半波电流

交流方波弧焊电源的优点如下：

- 1) 由于电流波形呈矩形，正、负极性半波转换可瞬间完成，方波电流过零后增长快，再引燃容易，稳弧性能显著提高。
- 2) 可以根据焊接条件选择最小而必要的 K ，使其既能满足清除氧化膜的需要，又能获得最小的钨极损耗和可能的最大熔深。
- 3) 正、负半周电流幅值可调，焊接铝、镁及其合金时，无需另加消除直流分量装置。

直流和交流钨极氩弧焊电流种类的特点见表 1-6-2。

表 1-6-2 直流和交流钨极氩弧焊电流种类的特点

电流种类	直流		交流	
	正接	反接	正弦波	方波
示意图				
阴极清理作用	无	有	有	有
两极热量比例 (近似)	焊件 70% 钨极 30%	焊件 30% 钨极 70%	焊件 50% 钨极 50%	通过占空比可调

(续)

电流种类	直流		交流	
	正接	反接	正弦波	方波
熔深	深、窄	浅、宽	中等	较深
钨极许用电流	最大 例如 $\phi 3.2\text{mm}$, 400A	小 例如 $\phi 6.4\text{mm}$, 120A	较大 例如 $\phi 3.2\text{mm}$, 225A	大 例如 $\phi 3.2\text{mm}$, 325A
电弧稳定性	很稳	不稳	很不稳	稳
直流分量	无	无	有	无

华南理工大学及其产学研合作单位的多年研究试验和生产实际应用表明，开发千安级的大功率交流方波 TIG 氩弧焊技术，取代进口同等功率的直流 TIG 氩弧焊技术，不仅可以实现焊接过程稳定、提高焊接速度和焊接质量，而且可大幅度节约焊接设备和保护气体的成本。

4. 脉冲弧焊电源

脉冲直流 TIG 焊的电流幅值或脉冲交流 TIG 焊的电流有效值按一定频率周期性地变化。每次脉冲电流通过时电弧燃烧强烈，弧柱扩展，焊件被加热熔化，形成一个点状熔池；基值电流通过时电弧暗淡产热量低，熔池冷却凝固，同时维持电弧稳定。脉冲钨极氩弧焊的电流波形如图 1-6-7 所示。因此焊接过程是一个断续熔化、凝固过程，焊缝由一个一个焊点叠加而成。电弧是脉动的，有明亮和暗淡相互交替的闪烁现象。

脉冲钨极氩弧焊的电流波形可根据焊接材料选择交流维弧与直流脉冲；交流维弧与交流脉冲；直流维弧与交流脉冲；直流维弧与直流脉冲等几种形式。焊接不锈钢或耐热合金时，一般用正极直流脉冲。焊接铝及其合金时应采用交流维弧与直流脉冲。

脉冲钨极氩弧焊一般取 0.5 ~ 10Hz 的低频脉冲，脉冲频率的选择主要取决于板材的厚度和焊接速度。对于同一厚度的板材，当提高焊接速度时，必须增加脉冲频率，否则熔池间隙大，焊点不能一个一个叠加形成连续焊缝。脉冲电流的增加，使得电弧获得更大的穿透能力，但过大的电流会导致钨极的局部熔化，一般取钨极氩弧焊所需焊接电流作为脉冲电流值。脉冲持续时间与电弧的热输入成正比。若持续时间过长，则热量损失大，发挥不出脉冲焊高效率的特点；若持续时间过短，则熔深太小，焊缝成形不佳。基值电流的大小反映了焊接电流的波动值，它直接影响熔池金属的冷却和结晶。基值电流大小的选择根据被焊接材料的性能来确定，焊接薄板时，为减小焊接变形，一般采用较小的基值电流。

随着脉冲电流频率的提高，电弧的电磁收缩效应也随之增强。实践证明，当脉冲频率超过 5kHz 后，电弧具有强烈的电磁收缩效果，电弧的挺度和刚度明显增大，即使焊接电流很小，电弧也有很强的稳定性和指向性，因而有利于薄板焊接。此外，随着脉冲电流频率的提高，电弧压力也随之增大，如图 1-6-8 所示。因而提高了电弧的穿透能力，有利于增加熔深。同时对焊接熔池金属有更强的电磁搅拌作用，有利于晶粒细化，消除气孔，获得优良的焊缝。

脉冲钨极氩弧焊扩大了钨极氩弧焊的应用范围，对

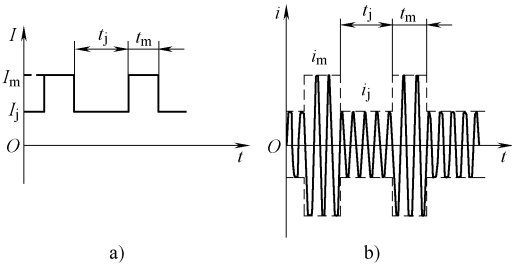


图 1-6-7 脉冲钨极氩弧焊电流波形

a) 直流脉冲钨极氩弧焊波形 b) 交流脉冲钨极氩弧焊波形
 I_m —直流脉冲电流 I_j —直流基值电流 i_m —交流脉冲电流 i_j —交流基值电流 t_j —基值电流持续时间

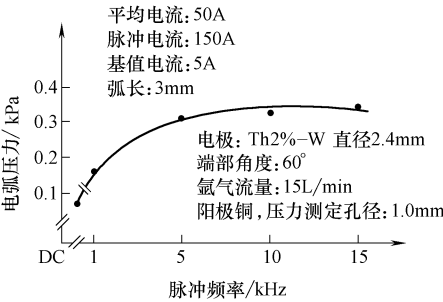


图 1-6-8 脉冲电流频率对电弧压力的影响

于不锈钢、耐热合金和铝合金的焊接具有质量好、效率高、焊接电弧稳定等优点。由于焊接电流脉冲化, 容易进行全位置焊接; 同时焊接电流的平均有效值降低, 可调参数多, 便于合理选择焊接热输入。

综上所述, 脉冲钨极氩弧焊有以下特点:

1) 脉冲焊在同样的平均电流水平下, 提高了电弧挺度, 特别是高频率脉冲焊, 效果更加显著, 这对于薄件焊接是很有利的。

2) 脉冲电弧加热集中, 热效率高, 热输入小, 有利于减小热影响区及焊接变形。

3) 焊接熔池处于周期性的加热和冷却过程, 控制了熔池的尺寸, 得到均匀的熔深, 适合于单面焊双面成形和全位置管道焊接。

4) 电弧脉冲式加热, 熔池金属高温停留时间短, 金属冷却快。同时可调节脉冲参数改变每个电弧焊点的热循环, 依靠后续脉冲电弧的热量, 对前一脉冲电弧形成的焊缝进行热处理, 起到细化晶粒, 改善焊缝组织的作用。这对于焊接热敏感的金属材料非常有利。

5) 高频电弧的电磁搅拌作用有利于熔池中气体的逸出, 减少气孔, 同时能得到细晶粒的焊缝组织, 提高接头的力学性能。

6) 脉冲焊接时电弧对工件的加热是脉动式的, 存在着加热的间隙时间, 焊接速度与直流焊接时相比要降低一些, 通常要降低 15% ~ 25%。

6.2.3 其他辅助设备、配套件的选配

1. 引弧装置和稳弧装置

TIG 焊引弧方式有短路引弧、高频引弧、高压脉冲引弧等几种。短路引弧时钨极损耗较大, 端部形状容易被破坏, 并对焊缝造成污染, 应尽量少用。TIG 焊时宜采用高频引弧、高压脉冲引弧等非接触式引弧, 因而需要专用的辅助引弧装置。对于正弦波交流 TIG 焊, 引弧后还需要采用稳弧措施, 这是因为焊接电流在正、负半周交替时要过零点, 电弧空间发生消电离过程, 而且当电弧由焊件接正转向接负的瞬间, 需要重新引燃电弧的电压很高, 而弧焊电源往往不能提供这样高的电压, 因此, 就需要有能使电弧重新引燃的稳弧装置。稳弧方法目前主要有高频稳弧、高压脉冲稳弧和交流矩形波稳弧等方式。交流矩形(方)波稳弧是利用交流矩形波在过零点时有极快的电流变化率, 使得电弧在极性转换时很快地反向引燃。对于非交流矩形波电源, 目前应用最多的是高频稳弧和高压脉冲稳弧。另外, 提高交流电源空载电压也可以起到一定的稳弧作用, 但会增大变压器的容量, 功率因素也会降低, 成本高, 不经济且不安全。

(1) 高频引弧和稳弧装置 采用高频振荡器, 产生一系列密布的高频高压脉冲。这种高的电压击穿钨极与焊件之间的间隙(约 3mm)产生电离。电离的气体又引燃焊接电弧, 达到引弧的目的。在交流焊接回路上叠加高频高压脉冲, 也有助于在电流的变向点上重新建立电弧, 起到稳弧的作用。

高频振荡器的电路原理图如图 1-6-9 所示。高频振荡器由升压变压器 T_1 、火花间隙放电器 D 、振荡电容 C 、振荡电感 L_1 、高频耦合变压器 T_2 组成。火花间隙放电器由两只钨棒组成, 两者之间的间隙可调, 一般间隙为 0.5 ~ 1.5mm。当高频振荡器的输入端接通电源后, 交流电源经变压器 T_1 升压并对电容器 C 充电, 因而放电器 D 端电压逐渐升高, 当电压达到一定值时, 间隙被击穿并发生火花放电。一方面使 T_1 的二次回路短路而中止对 C 充电, 另一方面使已经充电的电容 C 与 L_1 组成振荡电路, 所产生的高频高压经 T_2 二次侧输入焊接回路。由于 T_1 采用的是高漏抗变压器或串联电阻, 限制了短路电流而不至于被烧坏。

产生振荡的频率仅与电容 C 和电感 L_1 有关, 其振荡频率为 $f = 1/(2\pi\sqrt{L_1C})$ 。一般振荡电容 C 约为 0.0025 μ F, 电感 L_1 为 0.16 μ H, 因此实际振荡频率很高, 可达 150 ~ 260kHz。

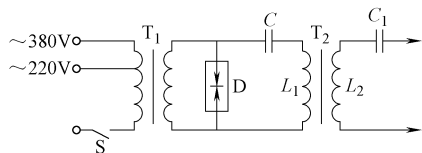


图 1-6-9 高频振荡器的电路原理图

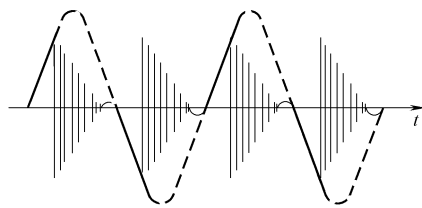


图 1-6-10 高频振荡波形

当弧焊电源为正弦波时，振荡是不连续的，每半周振荡一次，振荡是衰减的，每次能维持 $2 \sim 6\text{ms}$ 。高频振荡波形如图 1-6-10 所示。由振荡回路产生的高频高压通过 L_1 感应给 L_2 ，然后经过保护电容 C_1 送到钨极与工件之间，达到非接触引弧的目的。高频振荡器输出的电压一般为 $2500 \sim 3000\text{V}$ ，功率为 $30 \sim 100\text{mW}$ 。

高频振荡器电路中门开关 S 和保护电容 C_1 是为了安全设置的。只有在振荡器机壳门关上后 S 才接通，避免焊工与低频高压的带电部分接触。振荡器在正常工作时，输出高压电，但由于高频，有趋肤效应，对人体是安全的。如果振荡器电容 C 被击穿，这时输出的是 50Hz 的低频高压电，对人体是很危险的。有了保护电容 C_1 ，因它对低频阻抗大，能阻止低频电流通过，从而能保证人体安全。

高频振荡器与焊接回路有并联和串联两种连接方式，如图 1-6-11 所示。并联时，为了防止高频电压窜入弧焊电源和测量仪表，在主回路中串联一个电感 L 和并联一个旁路电容 C_2 。这种连接方式因 L 、 C_2 对高频有分流作用，消耗振荡器输出的引弧能量，因而引弧效果较差。此外，为了防止焊接电流通过耦合变压器二次构成回路，还需要加隔离电容 C_1 。串联时，没有分流回路，耦合变压器 T_2 二次侧是焊接回路的一部分，要通过焊接电流，导线较粗。为了减小截面，导线可用里面通冷却水的通水电缆线。在焊接回路中须加高频旁路电容 C_2 ，既可使高频不必通过阻抗大的焊接变压器，提高引弧效果，又可避免高频窜入弧焊电源内，大多采用串联式。

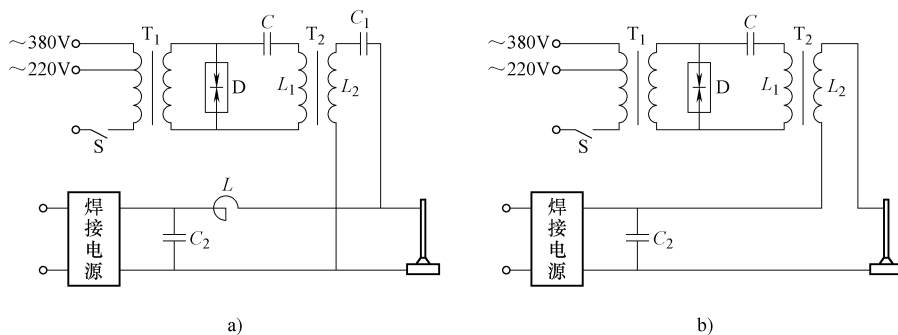


图 1-6-11 高频振荡连接方式

a) 并联式 b) 串联式

高频振荡器用来稳弧时，要求高频高压的输出和焊接交流电弧过零点的时间保持一定的相位关系，即振荡要在电弧从正极性转变到负极性时略超前一些才好，否则振荡太超前，到重复引燃时振幅已衰减过小。若振荡落后，则达不到重复引燃电弧的效果。但高频振荡器的高频高压的输出和交流电弧过零点的时间不易保证一致，稳弧不够可靠，加之高频振荡对人体健康也不利和对电子器件及仪器的干扰，在稳弧方面已很少采用。只要高频振荡器能够正常输出高频电压，就能引起电弧放电，用于焊接开始的第一次引弧是充分可靠的。

(2) 高压脉冲引弧和稳弧装置 采用高压脉冲引弧方式是在钨极与工件之间加一高压脉冲,既可以用于引弧,也可以用于交流 TIG 焊的稳弧。

高压脉冲发生器的原理如图 1-6-12 所示。变压器 T_1 为升压变压器,二次电压可达 800V,整流桥 UR 整流以后经电阻 R_1 对电容 C_1 充电。当需要产生脉冲时,晶闸管 VH_1 、 VH_2 被引弧脉冲触发导通, C_1 经过 R_2 、 VH_1 、 VH_2 向脉冲变压器 T_2 的一次侧放电, T_2 的二次侧即可感应出 2000~3000V 的高压脉冲,用于引弧或稳弧。电容器 C_1 放电回路中的 R_2 是用来保护晶闸管的。 T_2 的二次绕组串联在焊接回路中,以提高引弧效率。图 1-6-12 中的 C_{10} 、 R_7 、 R_5 和 VD_9 是脉冲引弧发生器串联应用时的旁路。旁路元件 C_{10} 是为了疏导高压脉冲电流的, R_7 是 C_{10} 的耦合放电电阻。为了防止振荡和提高引弧效率,在旁路中设置了高压二极管 VD_9 ,使得脉冲放电是单方向的。 R_5 是为了保护 VD_9 而设的限流电阻。 R_5 值不能大,否则有损旁路的作用。

交流 TIG 焊引弧时,由于焊件处于电源电压的负极性半周时引燃电弧比较困难。为了使高压脉冲引弧可靠,应当在此半周的峰值时叠加高压引弧脉冲。如图 1-6-13 所示,当相位在 $\pi/2$ 时,电源电压幅值达到最高,此时引弧效果最好。

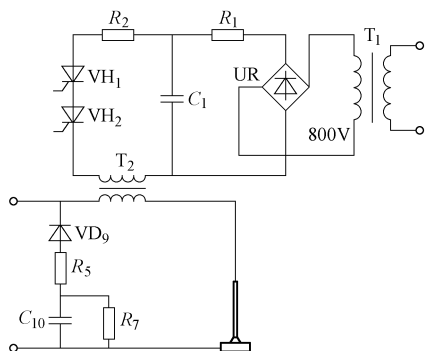


图 1-6-12 高压脉冲发生器的原理图

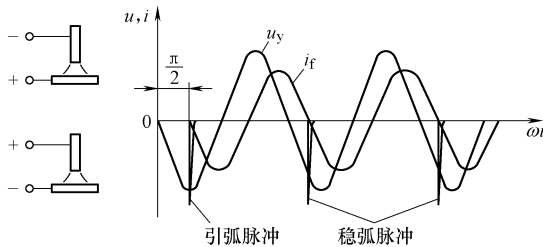


图 1-6-13 引弧和稳弧脉冲与电压和电流的相位关系

u_y —电源电压 i_f —电弧电流

电弧引燃后,产生了焊接电流,由于焊接回路存在电感,使焊接电流滞后电源电压一定相位角。稳弧脉冲应施加在焊接电流由正极性半周变为负极性半周的过零瞬间,此时电子发射转由焊件来执行,电弧重新引燃比较困难。因此,必须利用高压脉冲稳弧器,在每次焊件从接正级的半波向接负级的半波转换的瞬间向弧隙提供一个高压脉冲,使电弧连续燃烧下去。引弧和稳弧脉冲与电压和电弧电流之间的相位关系如图 1-6-13 所示。稳弧脉冲和引弧脉冲通常是由同一套电压脉冲发生电路提供的,但须由各自的触发电路控制。两者在相位上不一样,同时在引弧之前只产生引弧脉冲,而在引燃电弧之后,则只产生稳弧脉冲。

高压脉冲引弧和稳弧装置成本不高,简单易行,效果好。但只有在所产生的高压脉冲与电源电压和焊接电流之间保持严格的相位关系,才能得到理想的效果。

2. 焊枪

(1) 功能与要求 焊枪应具有夹持钨极、传导焊接电流和输送并喷出保护气体的功能,应满足下列要求:

1) 喷出的保护气体具有良好流动状态和一定的挺度,将四周空气排开,使焊接区域得到可靠的保护。

2) 夹持电极的接触电阻小,并且装卸方便。传导电流的零件有良好的导电性。

3) 小型焊枪和大型焊枪分别依靠保护气体和循环水来冷却焊枪,因此,枪体要有良好的气密性或水密性;只有枪体能被充分冷却,才能保证焊枪正常、持久地工作。

- 4) 在焊枪手柄上装有焊机“起动”和“停机”控制按钮。
- 5) 质量轻、结构紧凑，绝缘性能好，可达到性好，有一定的机械强度和装拆维修方便等。

(2) 类型与结构 焊枪分气冷和水冷式两种类型。气冷式焊枪一般用于焊接电流小于 160A 的场合。由于焊接电流小，发热量不大，其冷却主要由流动的保护气体来完成，无需水冷。其质量轻、结构紧凑简单、价格比较便宜；水冷式焊枪一般用于焊接电流大于 160A 的焊接，其冷却作用主要由流过焊枪内导电部分和焊接电缆的循环水来实现，结构比较复杂，价格较贵。焊枪一般由喷嘴、电极夹头、枪体、电极帽、手柄和控制按钮等组成。枪体用塑料压制成形，具有重量轻、绝缘性能好和一定的机械强度等特点。为了适应各种焊接情况，焊枪的形式可以是多种多样的，也可自行设计专用的焊枪，以满足空间位置狭小等特殊情况的焊接需要。焊枪头部的倾斜角度（即电极与手柄之间的夹角）在 0°~90°之间。图 1-6-14 是手工 TIG 焊用典型水冷式焊枪结构图。

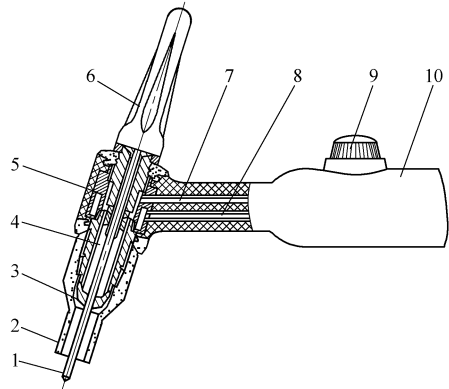


图 1-6-14 手工 TIG 焊用典型水冷式焊枪结构图
1—钨极 2—喷嘴 3—导气套管 4—电极夹头
5—枪体 6—电极帽 7—进气管 8—冷却水管 9—控制开关 10—焊枪手柄

焊枪的各种规格是按它能使用的最大电流来划分的，它们可采用不同规格的电极和不同类型与尺寸的喷嘴。表 1-6-3 为部分国产手工 TIG 焊焊枪的型号及技术规格。

表 1-6-3 焊枪型号及技术规格

型号	冷却方式	头部倾斜角度/(°)	额定焊接电流/A	适用钨极尺寸/mm		开关形式	质量/kg
				长度	直径		
PQ1—150	循环水冷却	65	150	110	1.6、2、3	推键	0.13
PQ1—350		75	350	150	3、4、5	推键	0.30
Q1—500		75	500	180	4、5、6	推键	0.45
QS—0/150		0(笔式)	150	90	1.6、2、2.5	按钮	0.14
QS—65/200		65	200	90	1.6、2、2.5	按钮	0.11
QS—85/250		85	250	160	2、3、4	船形开关	0.26
QS—65/300		65	300	160	3、4、5	按钮	0.26
QS—75/400		75	400	150	3、4、5	推键	0.40
QQ—0/10	气冷却(自冷)	0(笔式)	10	100	1.0、1.6	微动开关	0.08
QQ—0~65/75		65	75	40	1.0、1.6	微动开关	0.09
QQ—0~90/75		0~90(可变角)	75	70	1.2、1.6、2	按钮	0.15
QQ—85/100		85(近直角)	100	160	1.6、2	船形开关	0.20
QQ—0~90/150		0~90	150	70	1.6、2、3	按钮	0.20
QQ—85/150-1		85	150	110	1.6、2、3	按钮	0.15
QQ—85/150		85	150	110	1.6、2、3	按钮	0.20
QQ—85/200		85(近直角)	200	150	1.6、2、3	船形开关	0.26

3. 喷嘴

喷嘴的长度和形状对气流的保护性能影响很大。喷嘴下部的圆柱形通道越长，近壁层流层越厚，保护效果越好，因为通道加长有利于使紊乱的气流逐渐稳定下来并形成层流状态，能够有效地

将喷嘴口的空气排开，对焊接区域进行有效保护。但通道加长，有时使用不方便。因此，在生产中常在气流通道中加设多层铜丝网或多孔隔板，以限制气体横向运动，有利于形成层流。喷嘴通道直径越大，保护范围越宽，但可达性变差，且影响视线。通常圆柱通道内径 D_n （mm）、长度 L_0 （mm）和钨极直径 d_w （mm）之间的关系约为

$$D_n = (2.5 \sim 3.5) d_w$$
$$L_0 = (1.4 \sim 1.6) D_n + (7 \sim 9)$$

常见的喷嘴形状如图 1-6-15 所示。图 1-6-15a、b 为圆柱形带锥形或球形结尾的喷嘴，试验证明，圆柱形喷嘴保护效果最佳，此时气流通道截面不变，速度均匀，容易保持层流，生产应用较多。如图 1-6-15c 所示，圆锥形喷嘴出口处截面减小，气流速度变快，容易造成紊流，保护性能较差。但它的熔池可见度好，便于操作，常应用于薄件的焊接。

实用的喷嘴材料有陶瓷、纯铜和石英 3 种。高温陶瓷喷嘴既绝缘又耐热，应用广泛，但焊接电流一般不超过 350A；纯铜喷嘴使用电流可达 500A，需用绝缘套将其与导电部分隔离；石英喷嘴透明，焊接可见度好，但价格较贵。

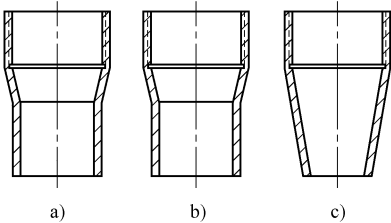


图 1-6-15 常见喷嘴形状

a) 圆柱形带锥形结尾 b) 圆柱形带球形结尾 c) 圆锥形

4. 供气系统与水冷系统

(1) 供气系统 由高压气瓶、气体减压阀、气体流量计、电磁气阀和软管等组成，如图 1-6-16 所示。气体减压阀将高压气瓶中的气体压力降至焊接所要求的压力，气体流量计用来调节和标示气体流量大小，电磁气阀用以控制保护气流的通断。

氩气瓶外涂蓝灰色，并标以“氩气”字样。其满瓶压力为 13.5MPa，标称容积为 40L，氩气容量为 6m³。减压阀和流量计常组合为一体，这样使用方便可靠。电磁气阀有交流和直流两种，它的开与关由控制电路决定。表 1-6-4 列出了 JL—15 和 JL—30 型减压流量计的技术数据。输送气体的软管一般采用聚氯乙烯塑料软管，使用时要防止水、水蒸气及其他脏物进入气路系统内。

表 1-6-4 JL—15、JL—30 型减压流量计技术数据

型号	流量范围 /(L/min)	耐压 /MPa	出气孔直径 /mm
JL—15	0 ~ 15	15(最低进口压力不小于 2.5 倍工作压力)	3.6
JL—30	0 ~ 30		

当采用混合保护气体进行焊接时，还要采用气体配比器，把不同的保护气体接入配比器的进气端，通过调节得到合适的混合气体。

(2) 水冷系统 水冷系统主要用来冷却焊枪、钨棒和焊接电缆。当焊接电流大于 160A 时需要水冷式焊枪。对于手工水冷式焊枪，通常将焊接电缆装入通水的软管中做成水冷电缆，这样可大大提高电流密度、减轻电缆重量，使焊枪更轻便。有时在水路中串接水压开关，当水流量不足时，保护控制系统不接通电源。水压开关型号及技术数据见表 1-6-5。焊机水冷系统使用自带的冷却水自动循环装置或者独立的自动循环冷却水箱，均可收到良好的冷却和节水效果。

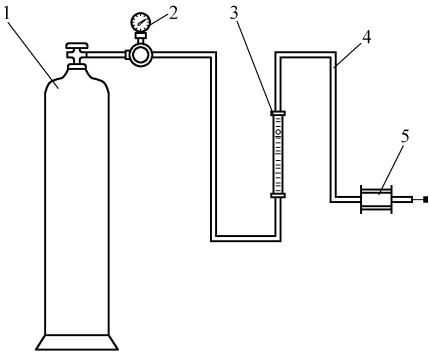


图 1-6-16 供气系统

1—高压气瓶 2—气体减压阀 3—气体流量计 4—软管 5—电磁气阀

表 1-6-5 水压开关型号及技术数据

型号	最高水压/MPa	动作最小流量/(L/min)	水管直径/mm
LF	0.15	1	φ6.35(1/4in)

6.2.4 焊接程序控制装置

焊接程序控制装置是将 TIG 焊接过程涉及的送气、引弧、电源输出、焊丝送进以及焊接小车行走等过程进行有序控制，以获得优质焊缝。通常对 TIG 焊程序控制系统要求如下：

- 1) 起弧前，提前 1.5 ~ 4s 输送保护气体，以排除气管内和焊接区的空气。
- 2) 灭弧后应滞后 5 ~ 15s 停气，以保护尚未冷却的钨极与熔池。
- 3) 焊接时，应自动起动和停止引弧器、稳弧器的工作。
- 4) 控制焊接电源的接通和断开，并在焊接即将结束时，使得焊接电流能自动地衰减，直至电弧熄灭，以消除和防止产生弧坑及弧坑裂纹。
- 5) 焊接时，焊枪的移动和焊丝的送进应同时协调地进行。
- 6) 用水冷式焊枪时，送水与送气应同步进行。

图 1-6-17 所示为 TIG 焊工作程序示意图。

6.2.5 典型的 TIG 焊机简介

目前，国产 TIG 焊机类型很多，各有特点。WS—160 是直流 TIG 焊机；WSJ—500 是交流 TIG 焊机；WSE—315 是交直流两用 TIG 焊机；WSM—200 是脉冲 TIG 焊机。虽然各种焊机的电路原理不尽同，但面对的基本问题是相同的。WSJ—500 型手工交流 TIG 焊机是比较典型的 TIG 焊机，在焊接生产中应用比较普遍。

WSJ—500 型焊机主要由弧焊电源、控制箱、焊枪、供气系统和供水系统等部分组成。控制箱内装有程序控制电路、高压脉冲引弧和稳弧器、消除直流分量的电容器组、气路的电磁气阀和水路的水压开关等。WSJ—500 型焊机电气原理如图 1-6-18 所示。它由焊接主回路、脉冲引弧电路和脉冲稳弧电路以及程序控制电路等组成。

1. 焊接主回路

(1) 弧焊电源 WSJ—500 型焊机主要用来焊接铝、镁及其合金。根据被焊接材料的特点，弧焊电源采用 BX3—1—500 型动圈漏磁式弧焊变压器，具有陡降外特性。

(2) 消除直流分量电路 消除直流分量电路由隔直电容 C_{11} 、二极管 VD_{10} 和电阻 R_6 组成。由于引弧选择在焊件为负半波时，所以在 C_{11} 两端按图 1-6-18 所示方向并联二极管 VD_{10} ，引弧时使焊接电流从 VD_{10} 直接通过，以利于引弧。当电弧稳定燃烧后，在焊件为负的半波时 VD_{10} 将 C_{11} 短接，从而使 C_{11} 更有效地消除直流分量。主接触器的常闭触点 KM_2 在焊接时打开，焊接结束时闭合，可使 C_{11} 上储存的电荷通过 R_6 释放，避免 C_{11} 带电产生危险。

(3) 高压脉冲旁路 高压脉冲旁路由 C_{10} 、 VD_9 、 R_5 和 R_7 组成。因为高压脉冲变压器 T_2 的二次绕组串联在焊接回路中，高压脉冲旁路的作用是避免高压脉冲电流通过焊接回路造成对弧焊电源损伤和脉冲的损耗。 C_{10} 的作用是过渡高压脉冲的， R_7 是释放 C_{10} 电荷，防止累积高压发生危险。 VD_9 的作用是只允许正向脉冲通过，也防止脉冲电流振荡， R_5 起保护 VD_9 的作用，也对振荡起抑制作用。 R_5 数值不宜太大，否则脉冲衰减严重。

2. 脉冲引弧电路和脉冲稳弧电路

在该焊机中，脉冲引弧电路与脉冲稳弧电路共用一套高压脉冲发生器电路，如图 1-6-12 所示。

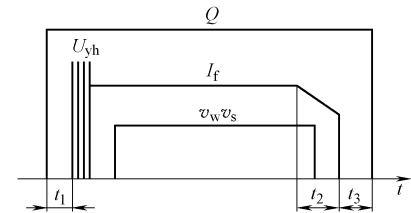


图 1-6-17 TIG 焊工作程序示意图
 Q —保护气体流量 U_{yh} —高频或脉冲引弧电流
 I_f —焊接电流 v_w —焊接速度 v_s —送丝速度
 t_2 —电流衰减时间 t_3 —延时断气时间

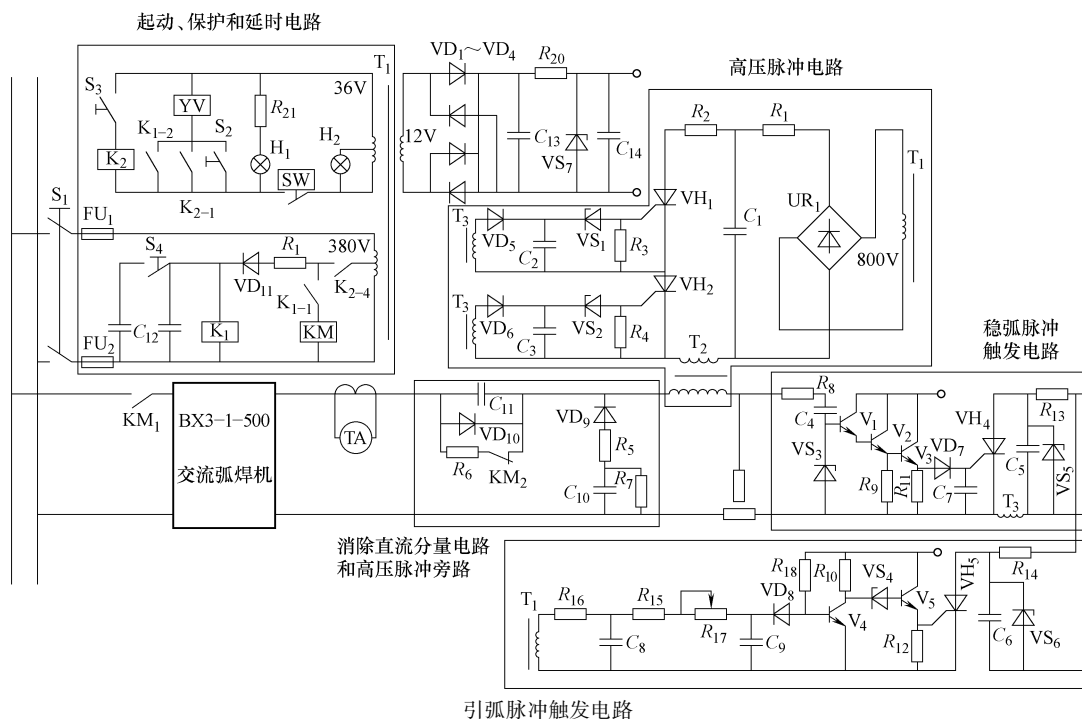


图 1-6-18 WSJ—500 型手工交流 TIG 焊机电气原理图

下面介绍引弧脉冲触发电路和稳弧脉冲触发电路。

(1) 引弧脉冲触发电路 引弧脉冲触发电路用来保证空载电压相位为 $\pi/2$ 时发出触发信号。电路由阻容移相电路、触发电路和低压脉冲电路组成。其中，阻容移相电路由 R_{16} 、 C_8 、 R_{15} 、 R_{17} 及 C_9 组成；触发电路由 V_4 、 V_5 、 R_{18} 、 R_{10} 、 R_{12} 、 VD_8 和 VS_4 组成；低压脉冲电路由 VH_5 、 C_6 、 VS_6 、 R_{14} 等组成。触发电路的信号取自变压器 T_1 的一个二次绕组 (24V)， T_1 与焊接变压器都取自同一相的网路， T_1 上的电压信号可以保证同步于焊接电源空载电压的交流波形。由于 90° 移相幅度大，故采用了两级阻容移相电路。 R_{16} 、 C_8 为第一级； R_{15} 、 R_{17} 及 C_9 为第二级。经过阻容移相电路移相 90° ，且当 C_9 上的电压为上负下正时（即焊件为负半周时），通过 VD_8 加到触发电路的 V_4 基极上而被截止，使 R_{12} 上有正电压输出。在这个电压的作用下，低压脉冲电路中的晶闸管 VH_5 被触发，在脉冲变压器 T_3 的二次侧感应出一个低压脉冲，使高压脉冲发生器电路中的 VH_1 及 VH_2 被触发导通，产生一个高压脉冲，使钨极与工件之间的间隙击穿，从而达到引弧的目的。当 C_9 上的电压为上正下负时，由于不能通过 VD_8 ，则不能产生高压脉冲。稳压管 VS_4 用来使 V_5 在不提供触发信号的另一半波时可靠截止，避免 VH_5 误触发。

(2) 稳弧脉冲触发电路 稳弧脉冲触发电路由信号衰减电路、触发电路和低压脉冲电路组成。其中，信号衰减电路由 R_8 、 C_4 及 VS_3 组成；触发电路是一个由晶体管 V_1 、 V_2 、 V_3 等组成的射极输出器；低压脉冲电路由 VH_4 、 C_5 、 VS_5 、 R_{13} 等组成。信号衰减电路的作用是为了避免引弧脉冲对稳弧脉冲触发电路的冲击。因为稳弧脉冲必须加在电流由正半波到负半波的过零点的瞬间。因此，稳弧脉冲信号源取自电弧电压，以保证稳弧脉冲对电流零点的跟踪。但直接取用电弧电压是不行的，因为产生的高压脉冲最终也叠加在电弧电压上。为了防止高压脉冲的冲击，电弧两端的信号首先经过信号衰减电路。信号衰减以后，再从 VS_3 的负端加到阻抗极大的射极输出器。很显然，由于稳压管 VS_3 的存在，只有在焊件由正半波向负半波转变，电流经过零点的瞬间，才能在 V_1 的基极输入一个正向的同步信号电压使 V_1 导通，并在 R_{11} 上输出正电压，触

发晶闸管 VH_4 ，此时与引弧脉冲电路相仿，由已充好电的 C_5 经 VH_4 导通放电给 T_3 一次侧，进而在 T_3 的二次侧感应出一个低压脉冲，使高压脉冲发生器电路中的 VH_1 及 VH_2 被触发导通，产生一个高压脉冲，达到稳弧的目的。

3. 程序控制电路

WSJ—500 型焊机的程序控制是由开关、继电器、接触器以及延时电路等来组成。气体的提前和滞后靠电容充放电延时电路控制，其他程序由继电器控制。由于配用通用焊接电源，该焊机没有电流衰减装置。其控制电路动作过程如下：

将电源开关 S_1 闭合，控制变压器 T_1 有电，指示灯 H_2 亮。开通冷却水（确保焊枪与脉冲变压器 T_2 得到水冷却），水流开关 SW 接通，水流指示灯 H_1 亮，说明焊机可以起动。闭合 S_2 ，电磁气阀 YV 通，可调整和检视保护气体流量。将焊枪上的 S_3 拨到闭合位置，开始引弧焊接。焊接程序控制电路的动作程序框图如图 1-6-19 所示。

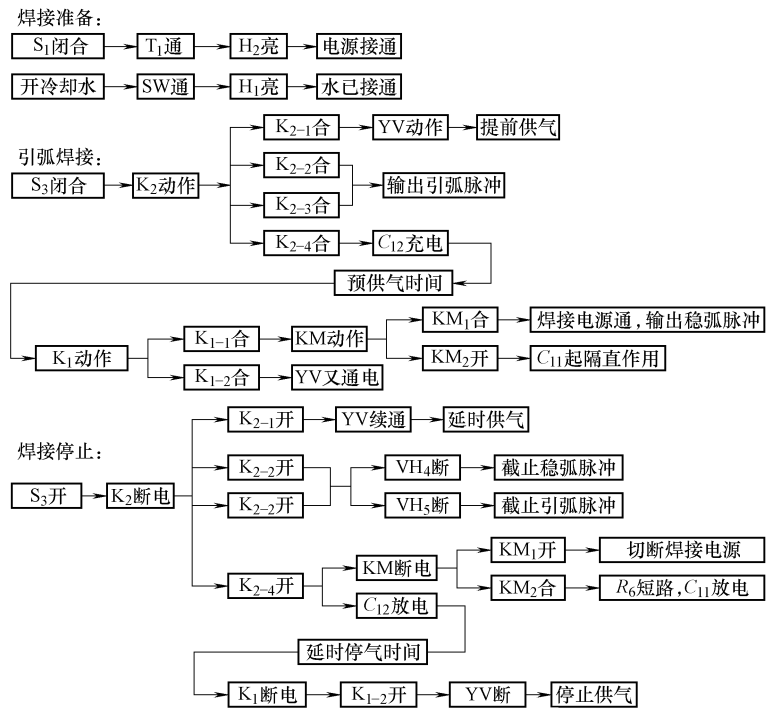


图 1-6-19 焊接程序控制电路的动作程序框图

6.3 TIG 焊用焊接材料及工艺

6.3.1 钨极及其选用

1. 对钨极材料的要求

TIG 焊用钨极材料，对 TIG 焊电弧的稳定性、钨极材料损耗和焊接质量都有很大的影响。钨极材料应满足以下要求。

(1) 发射电子能力强 钨极材料的电子逸出功要小，特别是在高温时具有较强的热电子发射能力，使引弧及稳弧性能好。

(2) 耐高温 在正常焊接过程中钨极材料不熔化烧损。

(3) 载流能力大 要求钨极材料具有良好的导电性和导热性。能承载较大电流而不会过热。

焊接时, 钨极端部要达到 3000K 以上的高温, 钨极受高温蒸发和缓慢氧化均会产生烧损。钨极的烧损使焊缝夹钨, 这对重要构件是不允许的。钨极端部形状变化, 会带来电弧形态的改变, 影响电弧力及对母材的热输入。同时也影响电极的使用寿命, 需要频繁更换电极。因此, 合理选择钨极材料, 减少钨极烧损是很重要的。

2. 钨极材料

钨极材料有纯钨极材料和钨的合金材料。在纯钨的基础上加入微量逸出功较小的稀土元素, 如钍 (Th)、铈 (Ce)、锆 (Zr) 等, 或它们的氧化物, 如氧化钍 (ThO_2) 和氧化铈 (CeO_2) 等, 对钨极发射电子非常有利。经常使用的钨合金材料有钍钨极和铈钨极。

(1) 纯钨极 钨是较好的电极材料, 它的熔点很高, 为 3380 ~ 3600℃, 沸点为 5900℃, 强度大 (850 ~ 1100MPa), 不易熔化和蒸发。钨的电子逸出功为 4.31 ~ 5.16eV, 高于铝 (3.95eV)、钾 (2.02eV) 等材料电子逸出功, 这对电子发射不利, 但钨的熔点高, 在高温时有强烈的电子发射能力, 一旦电弧引燃, 电弧还是很稳定的。与钍钨极 (逸出功为 2.7eV)、铈钨极 (逸出功为 2.4eV) 相比, 纯钨极要发射出等量的电子, 需要较高的工作温度, 在电弧中的消耗也较多, 需要经常重新研磨。纯钨极自身熔点最高, 在交流负半波更能抗烧损, 因此, 纯钨极一般在交流 TIG 焊中使用。这时纯钨极前端在熔化状态下呈现较好的半球状, 随后的形状保持比较容易。

(2) 钍钨极 钍钨极是在纯钨材料中加入质量分数为 1% ~ 2% 的氧化钍 (ThO_2) 制成。 ThO_2 的熔点为 3327K, 接近钨的熔点。钨极加入氧化钍后电子逸出功显著降低, 电子发射能力大大增强。钍钨极与纯钨极比较其优点是: 能够在较低的温度下发射出同等程度的电子数目, 因而容易引弧和稳弧, 延长电极使用寿命, 并且电极的载流能力增加, 即相同直径的电极可以流过较大的电流。TIG 直流正接焊接时, 常采用钍钨极。这时电极的前端熔化、烧损少于纯钨极。但是, 钍钨极中所含钍元素具有微量的放射性, 应用范围受到一定限制, 钍质量分数为 2% 的钍钨极已极少采用。钍钨极在使用过程中若不注意保护, 对焊工的健康是有害的。

(3) 铈钨极 在纯钨材料中加入少量微放射性稀土元素铈 (Ce) 的氧化物 (CeO_2) 就做成了铈钨极, CeO_2 的加入量通常质量分数为 1% ~ 2%。实践证明, 铈钨极能明显降低电子逸出功, 提高电极的引弧和稳弧性能, 基本能满足 TIG 焊要求。铈钨极是我国首先试制并应用的。国际标准化组织焊接材料分委员会根据我国应用铈钨极的情况, 已经把铈钨极列入非熔化极标准中, 并确定其代号为 WCe。铈钨极的优点表现如下:

- 1) 使用更加安全, 铈钨极与钍钨极相比降低了电极的放射性。
- 2) 直流焊接时, 阴极压降降低 10%, 比钍钨极更容易引弧, 电弧稳定性也好。
- 3) 化学稳定性好, 对保护气体纯度的要求比钍钨极略低。
- 4) 允许的电流密度大, 最大许用电流密度比钍钨极提高 5% ~ 8%。
- 5) 电极烧损率下降, 修磨次数减少, 使用寿命延长。

(4) 其他电极 这里包括锆钨极、镧钨极和钇钨极等。锆钨极含质量分数为 1% 左右的氧化锆 (ZrO_2), 载流能力强, 抗母材污染性好, 在电弧中的烧损较小, 保持电极端部形状 (半球形) 的功能强, 不易使焊缝夹钨。锆钨极也适合于在交流焊接中使用。此外, 人们正在研制的电极还有镧钨极 ($\text{W} + \text{LaO}_2 1\%$) (质量分数, 下同)、钇钨极 ($\text{W} + \text{Y}_2\text{O}_3 2\%$) 等, 进一步提高了钨极的性能。这些电极也适合于在中、大电流和交流焊接中使用, 具有烧损小的特点。

以上几种 TIG 焊常用电极的化学成分见表 1-6-6。成分中含有的 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 等为杂质, 这些杂质存在会降低电极熔点, 影响电极使用性能, 应予以限制。

表 1-6-6 TIG 焊常用电极的化学成分

电极牌号	化学成分(质量分数,%)						
	W	ThO ₂	CeO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	Mo	CaO
W1	>99.92	—	—	0.03	0.03	0.01	0.01
W2	>99.85	—	—	—	总含量不大于0.15		
WTh—10	余量	1.0~1.49	—	0.06	0.02	0.01	0.01
WTh—15	余量	1.5~2.0	—	0.06	0.02	0.01	0.01
WCe—20	余量	—	2.0	0.06	0.02	0.01	0.01

3. 电流容量

钨电极承载电流能力除了与电极材料有关系外，还与电极直径、电流的种类和极性、电极伸出长度和冷却程度等因素有关系。一定直径的钨电极对应有相应的极限电流。超过极限电流值，钨极将过热、熔化或蒸发，引起电弧不稳，焊缝夹钨。直流反接时，钨极发热量比正接时大，所以电流容量比正接要小。交流焊接时，极性是在变化的，电流容量介于直流正接和反接之间。为了防止电弧烧毁喷嘴和不影响操作者的视线，钨极端部应伸出喷嘴以外。如果钨极伸出过长，气体保护效果变差，钨极受电弧热和电阻热增加，降低了钨极许用电流值。因此钨极伸出喷嘴长度一般为5~10mm。表 1-6-7 为常用钨极的许用电流值。

表 1-6-7 常用钨极的许用电流值

电极直径 /mm	直流/A				交流/A	
	正接(电极－)		反接(电极＋)			
	纯钨	钍钨、铈钨	纯钨	钍钨、铈钨	纯钨	钍钨、铈钨
0.5	2～20	2～20	—	—	2～15	2～15
1.0	10～75	10～75	—	—	15～55	15～70
1.6	40～130	60～150	10～20	10～20	45～90	60～125
2.0	75～180	100～200	15～25	15～25	65～125	85～160
2.5	130～230	160～250	17～30	17～30	80～140	120～210
3.2	160～310	225～330	20～35	20～35	150～190	150～250
4.0	275～450	350～480	35～50	35～50	180～260	240～350
5.0	400～625	50～675	50～70	50～70	240～350	330～460
6.3	550～675	650～950	65～100	65～100	300～450	430～575
8.0	—	—	—	—	—	650～830

4. 电极端部形状

电极端部形状对电弧的稳定性有一定影响。直流 TIG 焊接时，一般采用直流正接。因为钨极为负极时发热量小。为了使电弧集中，燃烧稳定，电极端部一般修磨成圆锥形状。电极端部形状如图 1-6-20a 所示。在小电流时，为了提高电弧热量集中性，一般采用较小的电极锥角 α ，如 30°。在较大的焊接电流时，如果电极锥角过小，则会增加电极上的电压降，增加电极的产热，降低电极使用寿命，对焊接过程的稳定性不利。这时电极锥角 α 一般取较大值，如 90°。交流 TIG 焊时，由于兼有正、负极性，为了增强电极端部的抗热能力，避免负极性半周钨极过快烧损，电极端部一般修磨成半圆球形状。如图 1-6-20b 所示。钨极端部必须修磨光滑，否则，凹凸不平的电极端部使得电弧既不集中也不稳定。

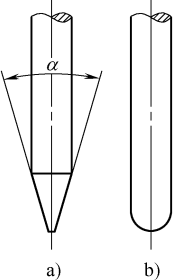


图 1-6-20 电极端部形状

6.3.2 保护气体及其选用

1. 保护气体种类及特性比较

TIG 焊用的保护气体主要是氩气、氦气或氩与氦各种比例的混合气体。有时也在氩气或氦气中加入氢气或氮气组成混合气体使用。

氩气（Ar）是无色无味的气体，比空气重 25%，作为焊接保护气体使用时，不易飘浮散失，有利于保护作用。氩在空气中的含量是 0.935%（体积分数），沸点为 -186℃，介于氧与氮的沸点之间，是分馏液态空气制取氧气的副产品。氩气中有害的杂质是氧、氮、氢、二氧化碳及水蒸气，氩气的成分见表 1-6-8。杂质含量过多会使钨极加速烧损，并使焊缝金属被氧化和氮化，增加焊缝金属的含氢量，降低焊接接头的质量。工业纯氩的纯度可达 99.99%（体积分数），完全能够满足焊接铝、钛等活泼金属的要求。

表 1-6-8 氩气成分（体积分数）

Ar(%)	N ₂ (10 ⁻⁶)	O ₂ (10 ⁻⁶)	H ₂ (10 ⁻⁶)	CO ₂ (10 ⁻⁶)	CnHm(10 ⁻⁶)	H ₂ O/(mg·m ⁻³)
>99.99	<100	<15	<5	<5	<5	<30

氩气作为保护气体焊接时，它既不与金属起化学作用，也不溶解于金属中。可以避免焊缝金属中的合金元素烧损，使焊接冶金反应变得简单和容易控制。它可以焊接高强度合金钢、铝、镁、铜及其合金以及异种金属等。氩气不像还原性气体或氧化性气体那样，它没有脱氧或去氢作用，对焊前的脱脂、去锈、去水等准备工作要求严格，否则就要影响焊缝质量。

氩气是单原子气体，高温时不分解吸热，热导率小，在氩气中燃烧的电弧热量损失较少。氩弧焊时，电弧一旦引燃就很稳定，是各种保护气体中稳定性最好的，一般电弧电压仅 8~15V。氩气是 TIG 焊中使用最广泛的气体。但氩弧容易扩展，呈典型钟罩形，加热不够集中。

除了氩气之外，氦气（He）也是 TIG 焊中常用的保护气体。氦气的电离电压为 15.7V，而氩为 24.5V，说明氦弧不如氩弧容易引燃和稳定。氦和氩的电弧静特性曲线如图 1-6-21 所示。从图 1-6-21 中可以看出，在一定的电流和弧长下，氦与氩的电弧电压不同，氦弧电压高，使电弧有较大的功率。氦气的冷却效果好，使得弧柱细而集中，电弧能量密度大，焊缝有较大的熔透率。氩弧电压较低，电弧的功率较小，产生的热量较少，约只有氦弧的 2/3。两者比较而言，采用氩气保护有利于薄板焊接。对于厚板、热导率高或熔点较高的材料用氦气更为有利。在同样电弧功率的情况下，氦弧可以使用比氩弧高 30%~40% 的焊接速度而不会产生咬边现象。但是氦气比氩气昂贵而且轻，氦气相对原子质量是氩气的 1/10，焊接时要获得同样的保护效果，氦气流量必须是氩气流量的 2~3 倍，显然焊接成本很高，限制了它在工业上的广泛应用。

氩加氦混合气体与氩、氦中加入氢的电弧静特性曲线如图 1-6-22 所示。从图中可以看出，在氩或氦中加入氢气将显著地线性提高电弧电压，这使得电弧的发热量也线性增加。氢可能对许多金属及合金产生有害的影响，仅能在某些特定的不锈钢及镍基合金上应用。

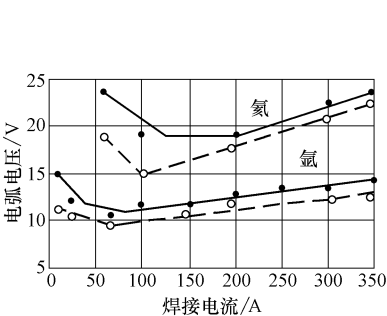


图 1-6-21 氩和氦的电弧静特性曲线
(实线表示弧长 4mm，虚线表示弧长 2mm)
(TIG 焊接铝)

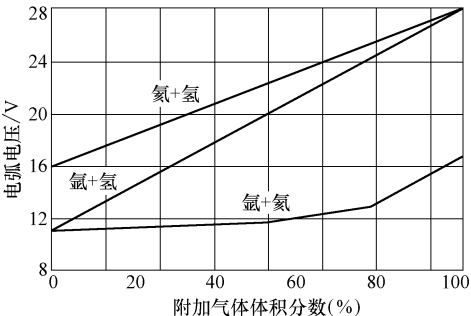


图 1-6-22 氩加氦混合气体与氩、氦中加入氢的电弧静特性曲线

对于铝、镁及其合金焊接，氩弧的阴极清理作用比其他各种电弧强，这对于开发氩弧焊的应用有重要作用。采用直流正接的氩弧焊时，没有阴极清理作用。氦弧发热量大且集中，电弧穿透力

强,在电弧很短时,有去除母材表面氧化膜的作用,可以顺利地焊接铝及铝合金。焊后焊缝表面有一层薄的黑尘,但容易擦掉,且内部质量良好,气孔和氧化物夹杂物等缺陷较少。实践证明,氦弧焊单道焊可以焊接 12mm 厚的铝板,正反两面焊可焊 20mm 厚的铝板。与交流氩弧焊相比,熔深大、焊道窄、变形小。焊接速度两倍于钨极交流氩弧焊。

2. 保护气体的选用

氩气、氦气或者它们的混合气均能成功地应用于焊接各种金属材料。从经济观点考虑,一般优先选用氩气。氩气的成本较低,流量要求较小。当焊接铝、铜等热导率高的原材料时,可以考虑选用氦气。另外,焊接不锈钢时可以在氩或氦中加入少量氢气;焊接铜及其合金时,有些情况下也可加入少量氮气。

在实际生产中有时采用氩-氦混合气体。氩气电弧稳定而柔和,阴极清理作用好;氦气电弧发热量大而集中,具有较大的熔深。两种混合使用就可以同时具有上述两者的优点。一般混合气体比例是 He 75% ~ 80% + Ar 25% ~ 20% (体积分数)。随着氦的加入量增加,熔深也随之增加,实际使用时,以加至所需熔深为准。

焊接不锈钢、镍基合金和镍-铜合金,有时使用氩-氢混合气体。使用氩-氢混合气体可提高电弧热功率,提高焊接速度,增加熔透,并有防止咬边,抑制 CO 气孔的作用。常用的比例是 Ar + H₂ (5% ~ 15%) (体积分数)。当焊接厚度为 1.6mm 以下的不锈钢对接接头时,焊接速度比纯氩气焊时快约 50%。但是,氢添加量过多会引起气孔。

6.3.3 焊丝及其选用

手工 TIG 焊用的填充金属是直棒(条),其直径范围为 0.8 ~ 6mm,长度在 1m 以内,焊接时用手送向焊接熔池;自动焊用的是盘状焊丝,其直径范围为 0.5 ~ 5mm。

在焊缝金属没有特殊要求的情况下,一般要求焊丝化学成分与母材相同,可以采用母材板材的切条,或采用成分与母材相当的标准焊丝作填充金属材料。这是因为在惰性气体保护下焊接时不会发生金属元素的烧损,填充金属熔化后其成分基本不变。

在焊缝金属有特殊要求的情况下,TIG 焊主要通过焊丝来调节焊缝的成分及力学、物理性能来满足焊件的要求。如纯铜和白铜材料本身不含脱氧元素,在 TIG 焊时一般选择含有硅的质量分数为 0.5%、磷的质量分数为 0.15% 或 Ti 的质量分数为 0.3% ~ 0.5% 脱氧剂的无氧铜焊丝和白铜焊丝,如 HSCu 等。它们具有较高的电导率和与母材颜色相同的特点。对于白铜,为了预防气孔和裂纹的发生,即使焊接刚度较小的薄板,也要求采用加丝来控制熔池的脱氧反应。

6.3.4 TIG 焊安全技术

1. TIG 焊的有害因素

TIG 焊影响人体的有害因素有以下四个方面:

(1) 有毒气体 空气中氧在焊接电弧辐射短波紫外线的激发下,大量被破坏,生成臭氧。臭氧是一种有刺激性气味的有毒气体,呈淡蓝色。在焊接电弧的高温作用下,引起空气中氮、氧分子离解,重新结合形成氮氧化物,明弧中常见的氮氧化物是二氧化氮。氮氧化物也是具有刺激性气味的有毒气体。氩弧焊时,弧柱温度高。紫外线辐射强度远大于一般电弧焊,在焊接过程中会产生大量的臭氧和氮氧化物,尤其臭氧其浓度远远超出参考卫生标准。臭氧和氮氧化物的主要危害是对呼吸道和肺有强烈刺激作用,会对呼吸系统造成伤害。

(2) 放射性 钨钨极中的钍是放射性元素,在氩弧焊时其放射剂量很小,根据对 TIG 焊的放射性测定,一般都在允许范围之内,危害不大。但是在钨钨极磨尖、修理以及储存地点,放射性浓度远远大于焊接地点。如果放射性气体或微粒进入人体作为内放射源,则会严重影响身体健康。

(3) 高频电磁辐射 采用高频引弧时,产生的高频电磁场强度在 $60 \sim 110\text{V/m}$ 之间,超过参考卫生标准 (20V/m) 数倍。每次起动高频振荡器的时间只有 $2 \sim 3\text{s}$,每个工作日接触高频又是断续的,高频电磁辐射对人体影响较小,一般不足以造成危害。如果频繁起弧,或者把高频振荡器作为稳弧装置在焊接过程中持续使用,则高频电磁辐射可成为有害因素之一。高频电磁辐射主要引起神经衰弱和植物性神经功能紊乱,严重时会使血压不正常。

(4) 弧光辐射 TIG 焊产生的弧光辐射包括紫外线、红外线和可见光。紫外线过度照射引起急性角膜炎,也可引起皮炎、弥漫性红斑等伤害。过强的红外线照射将造成眼睛慢性损伤,视力减退。过强的可见光将对视网膜产生烧灼,造成电光性眼炎。

2. 安全防护措施

(1) 通风措施 TIG 焊工作现场要有良好的通风装置,以排出有害气体及烟尘,保护焊工的身体健康。焊接车间的设计要充分考虑到车间的换气通风量。在焊接工作量大、焊机集中的地方,可安装几台轴流风机向外排风。

近年来将烟罩、软管、风机、净化装置及控制元件组装成一个便于移动的整体排烟除尘装置发展很快,研制了供狭小空间使用的手提式小型轻便机组,供单个工位使用的移动式轻便机组,供多个工位使用的排烟量较大的移动式机组等。这些装置的合理使用能将电弧产生的有害气体排走。在容器内焊接又不能采用局部通风的情况下,可以采用送风式头盔、送风口罩或防毒口罩等个人防护措施。

(2) 防护放射性措施 尽可能采用剂量极小的钍钨极。钍钨极和钍钨极磨尖时,应采用专用砂轮来加工,砂轮机应安装除尘设备。接触钍钨棒后,要洗净手脸。钍钨极和钍钨极应放在铝盒或铁箱内保存。

(3) 防护高频电磁辐射的措施 为了防备和削弱高频电磁场的影响,采取的措施有以下方面:

- 1) 焊件良好接地。接地点距焊件越近,效果越好。
- 2) 焊枪电缆和地线要用金属编织线屏蔽。
- 3) 在不影响使用的情况下,适当降低振荡器频率。
- 4) 减少高频电作用时间,尽量不要使用高频振荡器作为稳弧装置。

(4) 防护弧光辐射措施 主要采取如下措施:

- 1) 采用性能合格的护目滤光片,并根据焊接电流大小选择正确的滤光片遮光号。
- 2) 佩戴面罩、工作服、手套等防护用品。氩弧焊时,由于臭氧和紫外线作用强烈,宜穿戴非棉布工作服,如铝膜防护服或防火阻燃物制作的工作服等。
- 3) 采用弧光隔离防护屏,避免交叉影响。

6.4 TIG 焊其他方法和新技术

6.4.1 热丝 TIG 焊

普通的填丝 TIG 焊,焊接过程稳定,质量好,但效率低。而单纯依靠增加焊接电流的方法来提高 TIG 焊效率,受到钨极许用电流的限制。人们将注意力转向提高填充焊丝的熔化速度,利用附加电流预先加热填充焊丝,以提高焊丝的熔化速度,增加熔敷效率,由此开发了热丝 TIG 焊 (Hot Wire TIG)。

1. 热丝 TIG 焊工作原理

热丝 TIG 焊工作原理如图 1-6-23 所示。一般 TIG 焊枪和焊丝加热端接负极,焊件接正极。填充焊丝在进入熔池之前由加热电源通过导电块对其通电,依靠电阻热将焊丝加热至预定温度,但不

产生电弧，导电块至熔池之间的焊丝长度约 10cm，焊丝与钨极成 40°~60°角，从电弧前进方向后侧送入熔池，这样熔敷速度可比通常所用的冷丝提高 2 倍以上，如图 1-6-24 所示。同时减小了焊接熔池从电弧中吸收的热量，使热影响区宽度变窄，适于焊接对热输入敏感的材料和堆焊。

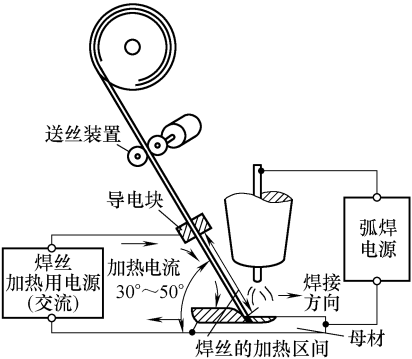


图 1-6-23 热丝 TIG 焊工作原理示意图

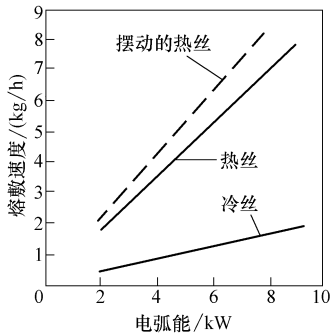


图 1-6-24 热丝 TIG 焊的熔敷速度

热丝 TIG 焊时，由于流过电流的焊丝与 TIG 电弧距离很小，热丝中电流所产生的磁场会使 TIG 电弧产生磁偏吹，从而影响热丝 TIG 焊过程的稳定性。为此，通常采用交流电源加热填充焊丝或采用脉冲调制，并限制加热电流不超过焊接电流的 60%，使 TIG 焊电弧和热丝电流峰值相互交替，以减少磁偏吹。所使用的焊丝直径通常不大于 1.2mm，如焊丝直径过大，由于电阻小，需增大加热电流，这对防止磁偏吹不利。

表 1-6-9 为使用两种不同 TIG 焊方法焊接窄间隙试样的比较。热丝 TIG 焊焊接效率整整提高了一倍。此外热丝 TIG 焊还可以减少焊缝中的裂纹。

表 1-6-9 热丝 TIG 焊与常规 TIG 焊的对比

冷丝		焊层	1	2	3	4	5	6
		焊接电流/A	300	350	350	350	300	330
		焊接速度/(mm/min)	100	100	100	100	100	100
		送丝速度/(m/min)	1.5	2	2	2	2	2.7
热丝		焊层	1	2	3	4	5	—
		焊接电流/A	300	350	350	310	310	—
		焊接速度/(mm/min)	200	200	200	200	200	—
		送丝速度/(m/min)	3	4	4	4	4	—

2. 应用

热丝 TIG 焊工艺已经成功地应用于碳钢、低合金钢、不锈钢、镍和钛等金属的焊接。铜和铝的电阻率太小，不容易产生电阻热，因此一般不推荐使用热丝 TIG 焊。

热丝 TIG 焊由于效率高，通常可使焊接速度增加 3~5 倍，因此可应用于快速焊的生产线上。日本巴布日立工业公司与广岛大学利用热丝 TIG 焊接方法在板厚 1.5 mm 的不锈钢搭接焊中成功地实现了 5m/min 的超高速焊接。在焊接发电设备等厚壁压力管道和容器中，为了提高焊接效率，也采用多种窄间隙热丝 TIG 焊工艺，如图 1-6-25 所示。

6.4.2 TIG 点焊

TIG 点焊是从普通 TIG 焊派生出来的一种焊接方法。在氩气保护下，以钨极与焊件之间产生的电弧为热源，使两块相叠焊件局部熔化，形成点状焊缝的焊接方法。焊成的点焊缝如图 1-6-26 所示。

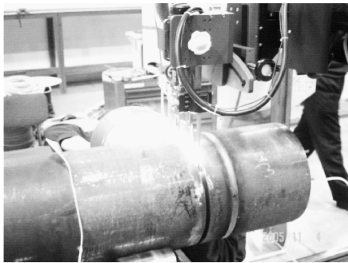
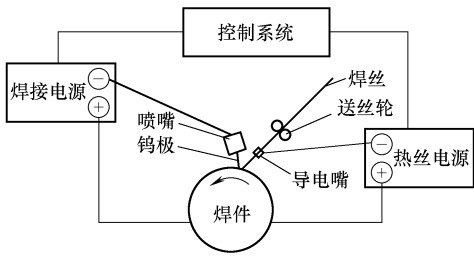


图 1-6-25 窄间隙热丝 TIG 焊原理

TIG 点焊一般采用直流正接法，并采用高频辅助间接引弧。TIG 点焊时，将专用的点焊枪对准所需焊接的位置，起动控制开关，氩气从喷嘴中喷出，然后喷嘴中央的钨极与焊件引燃电弧。当熔化的金属在电弧热量的作用下达达到足够的熔深和熔宽时，氩弧便自动衰减，然后熄灭，最后关闭氩气，移开焊枪，完成一个 TIG 点焊的焊点。为了使焊点表面形状圆滑平整，熄弧电流必须自动衰减。为了消除焊点中的缩孔、疏松，通常可采用电流衰减法和二次电流法（二次通电）。由于整个焊接过程在氩气保护下完成，因此焊点质量可靠。

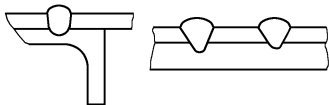


图 1-6-26 TIG 点焊的焊点

TIG 点焊的优点是可单面施焊，也可以点焊厚度相差悬殊的焊件，不需要压缩空气等辅助能源，操作灵活方便，焊点成形美观。其缺点是焊接效率比电阻点焊低且焊接费用较电阻点焊高。通常用于点焊各种薄板结构及薄板与厚板的连接，适用于不锈钢和低合金钢的焊接，也可用于焊接有色金属。

6.4.3 管-管和管-管板 TIG 焊

在锅炉、化工、电力及核电等领域的管线以及换热器的生产和安装中，存在大量的管-管和管-管板的焊接，通常都采用 TIG 焊方法。

1. 管-管 TIG 焊

在工业管道制造和安装过程中，许多情况下管道是固定不动的，此时要求焊枪围绕焊件作 360°的空间旋转。完成一条焊缝的过程实际上是全位置焊接，每种位置需要不同的焊接参数相匹配，为了保证焊缝获得均匀的熔深和熔宽，要求参数稳定而精确。同时，要求机头的转速稳定而可靠，并与焊接参数相适应。厚板大直径管道焊接时，机头还需进行不同形式和不同频率的摆动。TIG 焊或脉冲 TIG 焊由于其电弧非常稳定，无飞溅，热输入调节方便，易得到单面焊双面成形的焊缝，是管道焊接的理想方法。

(1) 坡口形式 根据管子壁厚和生产条件，可以采用多种坡口形式。表 1-6-10 为不锈钢管对接的焊接坡口形式。为了保证一定的余高，焊前将管端适当扩口或者添加填充焊丝，也可以用 TIG 焊打底后再用焊条电弧焊盖面。

表 1-6-10 不锈钢管子对接焊坡口形式

坡口形式	焊接方法	坡口尺寸/mm				坡口图
		δ	b	α	p	
I 形	加填充焊丝 TIG 焊	≤ 1.5	≤ 0.1	—	—	

(续)

坡口形式	焊接方法	坡口尺寸/mm				坡口图
		δ	b	α	p	
扩口形	无填充丝 TIG 焊	≤ 2	≤ 0.1	$60 \pm 10^\circ$	—	
V 形	TIG 焊或 TIG 焊封底加焊条电弧焊	2 ~ 10	$C \leq 0.1$	80°	0.1 ~ 1.0	
	衬熔化垫圈 TIG 焊	≥ 2	< 0.2	50°	0.1 ~ 1.0	
U 形	TIG 焊或 TIG 焊封底加焊条电弧焊	12	≤ 0.1	15°	0.1 ~ 1.0	
		20	≤ 0.1	13°	0.1 ~ 1.0	

(2) 焊接工艺 表 1-6-11 列出了不锈钢管子全位置 TIG 焊的焊接条件。在一个接头的焊接过程中，焊接电流大小和机头运动速度应相互配合，在电弧引燃后焊接电流逐渐上升至工作值，将焊件预热并形成熔池，待底层完全熔透后，机头才开始转动。电弧熄灭前，焊接电流逐渐衰减，机头运动逐渐加快，以保证环缝首尾平滑地搭接。

表 1-6-11 1Cr18Ni9Ti^① 不锈钢管子对接全位置 TIG 焊焊接条件（直流正接）

管子尺寸 /mm	坡口 形式	层数	钨极直径 /mm	填充丝 直径 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(周/s)	送丝速度 /(cm/min)	氩气流量 /(L/min)	
									喷嘴	管内
$\phi 18 \times 1.25$	管子	1	$\phi 2$	—	60 ~ 62	9 ~ 10	12.5 ~ 13.5	—	8 ~ 10	1 ~ 3
$\phi 32 \times 1.5$	扩口	1	$\phi 2$	—	54 ~ 59	8 ~ 9	18.5 ~ 22.0	—	10 ~ 13	1 ~ 3
$\phi 32 \times 3$	V 形	1	$\phi 2 \sim \phi 3$		110 ~ 120	10 ~ 12	24 ~ 28	—	8 ~ 10	4 ~ 6
		2 ~ 3	$\phi 2 \sim \phi 3$	$\phi 0.8$	110 ~ 120	12 ~ 14	24 ~ 28	76 ~ 80	8 ~ 10	4 ~ 6

① GB/T 20878—2007《不锈钢和耐热钢 牌号及化学成分》标准中没有对应的新牌号，但考虑应用较多，此处保留旧牌号。

2. 管-管板 TIG 焊

管与管板之间的连接，有胀接、胀接加焊接、焊接等类型。就焊接而言，又可分为端面焊接和内孔焊接两种方式。

(1) 端面焊接 如图 1-6-27 所示，它具有焊接方便，外观检查和修补容易等优点。其缺点是管子和管板之间存在缝隙，虽然通常都同时采用胀管工艺，这种缝隙也难以完全消除，在使用过程中，介质和污垢存在于缝隙中，容易产生腐蚀。

(2) 内孔焊接 这是为改进端面焊接的缺点而采取的较先进的工艺方案，它是一个全焊透的接头，没有缝隙，没有应力集中点，抗应力腐蚀能力强，疲劳强度高，

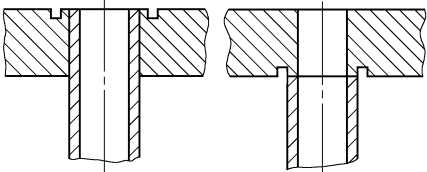


图 1-6-27 管板焊接的两种接头方式

缺点是对管板加工、装配以及焊接设备与技术要求较高,返修困难,成本较高。

大多数情况下还是采用端面焊接。内孔焊接仅在一些高温高压、强腐蚀性介质及核反应堆等特殊工作条件的热交换器中应用。

6.5 TIG 高速焊技术

6.5.1 活性剂 TIG 焊技术

普通 TIG 焊通常在单层焊接时只能获得较小的熔深,对于较厚的焊件,要求背面焊透时必须开坡口,并采用多层焊接。为了提高 TIG 焊的效率,降低成本,20 世纪 60 年代巴顿焊接研究所提出了活性剂 TIG 焊的概念,并用于钛合金焊接中。此后,英、美、日等国相继研制出用于不锈钢、碳钢、低合金钢、镍基合金、铜镍合金等不同材料的活性剂,活性剂 TIG 焊技术的研究和应用得到了迅速发展。

活性剂 TIG 焊 (Activating Flux - TIG, 简称 A-TIG) 是在被焊焊件的表面,涂敷一层很薄的活性剂,然后进行 TIG 焊。在同样的焊接参数下,可使焊缝熔深比一般 TIG 焊增加 1~3 倍。对板厚 12mm 以下的低碳钢采用 I 形对接坡口可一次焊接完成。

1. A-TIG 焊机理

A-TIG 焊能增加熔深,是由于活性剂对电弧、熔池表面张力和阴极斑点等共同作用的结果。对其机理的解释主要有两种:电弧收缩说法和熔池表面张力说法。

(1) 电弧收缩说法 活性剂在电弧高温作用下,发生蒸发并以原子态包围在电弧周围区域。在电弧中心区域,电弧的温度高于活性剂组分分子的分解温度,保护气体和活性剂的原子被电离成电子和正离子。由于电弧周围区域温度相对较低,活性剂蒸发的元素仍以分子和原子形式存在,被分解的原子大量俘获该区域中的电子形成负离子,如图 1-6-28 所示。使电弧周围区域作为主要导电的电子大大减少,导电能力下降,迫使电弧收缩。其次,由于活性剂的各组分均为多原子分子,在电弧温度下发生热解离而产生吸热反应,也迫使电弧压缩。

活性剂的组成物本身是不导电的。它们的熔点和沸点都比被焊金属高,只在电弧中心温度较高的区域有金属蒸气,活性剂涂层的存在,限制了阳极斑点区,使电弧不能扩展。

A-TIG 焊阳极根部呈收缩状,而普通 TIG 焊阳极根部为发散状,阳极根部形状对熔池表面温度分布有强烈影响。由于电弧收缩,电弧电压增加,热量集中,从而使焊缝熔深增加。

(2) 熔池表面张力说法 表面张力理论认为,熔池金属流动状态对焊缝的几何形态有很大的影响。一般焊缝金属在熔化状态下,表面张力具有负的温度系数,即熔池液态金属从表面张力小的区域向表面张力大的区域流动。表面张力取决于熔池液体表面温度梯度和熔池金属中存在的某种微量元素或接触到的活性气氛(如 O、S)。熔池中不存在活性元素时,熔池表面张力一般随温度升高而降低。在电弧正下方的熔池中心处表面张力较小,而熔池边缘表面张力较大。这种表面张力的分布使熔池中心的液态金属向边缘流动,如图 1-6-29a 所示。这种液态流动模式使得焊缝宽而浅。一旦熔池中含有某些微量元素或表面活性元素,则熔池液态金属从熔池边缘向中心流动,形成图 1-6-29b 所示的流动状态,可有效地使熔池中心高温传递至熔池底部,形成冲刷作用,形成了一个相对深而窄的焊缝。

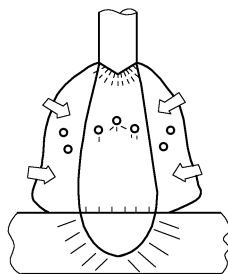


图 1-6-28 负离子引起的电弧收缩

2. A-TIG 焊的特点

A-TIG 焊的主要优点如下:

1) 能显著增加熔深, 提高焊接效率, 降低焊接成本。在焊接工艺不变的情况下, 与常规 TIG 焊相比, A-TIG 焊可以提高熔深一倍以上, 而且不增加正面焊缝宽度。如不锈钢焊接可由普通 TIG 焊的 3mm 熔深, 增加到 12mm, 可一次单面焊 10mm 不锈钢板。因此对于中等厚度的材料可不开坡口一次焊透, 对于更厚的工件则可以减少焊道的层数。对于薄板 A-TIG 焊可以提高焊接速度, 或者使用较小的焊接参数焊接。

2) 高效节能, A-TIG 焊的综合效率高。由于 A-TIG 焊熔深大, 对一定厚度的工件不开坡口可一次焊透; 在焊接厚板时, 可加大坡口的钝边, 减少坡口加工量, 从而减少填充材料、焊层及辅助时间。与普通 TIG 焊相比, 在板厚相同的情况下, 其消耗功率约减少一半, 焊接时间可节约一半, 是一种高效节能的焊接方法。

3) 焊接变形和残余应力小, 可提高焊接质量。A-TIG 焊通过在同等焊接速度下采用较小的焊接参数, 可以有效地减小焊接变形。通过调整活性剂的成分, 可以改善焊缝的组织 and 性能。此外, 钛合金 A-TIG 焊能够消除常规 TIG 焊所表现出的氢气孔, 也可以净化焊缝 (降低焊缝中的含氧量)。

4) 操作简单、方便、成本低。A-TIG 焊使用特殊的活性剂, 在焊前涂敷到被焊工件的表面, 使用普通的 TIG 焊设备和焊接参数就可以进行焊接。

5) 焊缝正反面熔化成形好。A-TIG 焊得到的焊缝, 其正反面熔化宽度比例更趋合理, 熔宽均匀稳定, 由于焊件散热条件变化或者夹具压紧程度不一致所导致的背面出现蛇形焊道及不均匀熔透的程度减低, 对保证焊缝使用性能有利。

A-TIG 焊的不足之处主要在于以下方面:

- 1) 焊前焊件表面焊接处应打磨露出金属光泽。
- 2) 焊缝表面成形较差。
- 3) 焊后焊缝表面残留活性剂, 清理较困难。

3. 活性剂类型

活性剂的类型主要有以下几类:

(1) 卤素化合物型 以氟化物和氯化物为主组分的活性剂。主要用于焊接钛合金, 可焊接厚度为 7mm 的钛合金, 采用 I 形对接坡口一次焊透。由于此类活性剂对人体有害, 一般不再使用。

(2) 氧化物和氟化物型 其主要组分以氧化物为主, 加入一定的氟化物, 主要用于不锈钢、碳钢等金属的焊接。

(3) 氧化物型 主要组分为氧化物, 不含硫、碳氢化合物和氟化物。可用于 300 多种奥氏体不锈钢的焊接。

4. 活性剂的使用

首先将活性剂的组分混合均匀, 然后用乙醇或丙酮等易挥发的有机溶剂, 将其制成糊状或悬浮

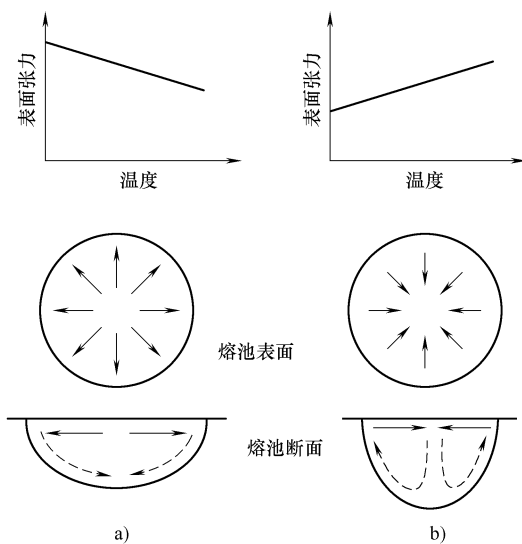


图 1-6-29 熔池表面张力对熔池金属流动和熔深的影响

- a) 液态金属由熔池中心向边缘流动
- b) 液态金属由熔池边缘向中心流动

状,或做成喷雾剂状。使用时可采用人工方法刷涂,也可用机械方法涂敷或直接喷涂在焊件表面。一般在涂敷前应先将焊件表面打磨出金属光泽,涂敷宽度为 10 ~ 20mm,在生产应用中涂敷量以涂层充分遮盖住金属光泽为宜,相应的厚度为 0.013mm 左右,活性剂使用量为 0.3g/m 左右。当溶剂挥发后,细微活性剂粉末附着在被焊工件表面,便可以在活性剂涂层上施焊。

焊后应将焊缝两侧钢板上残留的活性剂清除,可采用人工方法也可用机械方法。

6.5.2 多元保护气(加氢等) TIG 高速焊技术

在实际工程中,大、中厚度的高导热性材料(如纯铜、铝等)的熔化焊接,无论是采用熔化极电弧焊还是非熔化极电弧焊,一般均需采用焊前预热的办法。预热温度的高低,与被焊接材料的种类、焊件厚度、焊接方法及其焊接参数等因素有关。通常,电弧能量越大、越集中,预热温度则可越低,甚至不需预热。

在钨极氩弧焊中,加入一定比例的氢气,可有效地提高电弧的热功率特别是阳极热功率,是焊接大、中厚度高导热性材料的一种较有前途的电弧,所以钨极氢弧焊及钨极氩-氢混合气体保护焊一直受到人们的重视。随着氢气价格的不断降低以及实际工程中铜、铝等材料的不断增多,钨极氢弧焊及钨极氩-氢混合气体保护焊的应用将会日益广泛。

6.5.3 双电极 TIG 焊

双电极 TIG 焊是一种高速 TIG 焊的高效焊接方法。但是,在直流 TIG 焊多电极焊接时,由于相近的电极通以相同方向的电流,电极间的电弧相互作用极易造成磁偏吹,使得焊接过程中电弧出现偏摆而不稳定,应用困难。为了克服这一缺点,采用两个电弧交替供电的方法,如图 1-6-30 所示。

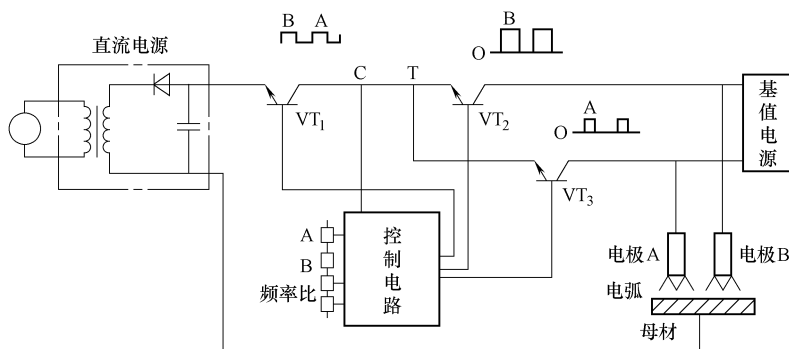


图 1-6-30 双电极脉冲 TIG 焊

由于两个电极电流相互错开,可以减少或者避免磁偏吹,因此可以用较大的焊接电流,提高焊接速度,改善焊缝成形质量,克服了单电极大电流焊接时引起的焊道“驼峰”现象。

6.5.4 TIG-激光复合能源高速焊技术

随着工业激光器技术的成熟,激光焊已经在工业领域特别是汽车工业得到了较广泛的应用,如车身侧面与顶盖的激光焊以及变速器齿轮、气门挺杆等汽车零部件的激光焊。激光焊的主要优点如下:

- 1) 热输入量小、深宽比大,热影响区小,工件收缩和变形较小。
- 2) 焊道窄且表面质量好,焊缝强度高。
- 3) 激光束控制比较灵活,柔性大,能够焊接其他焊接方法难以达到的位置。
- 4) 焊接速度通常比其他焊接工艺快,易于实现自动化。

与此同时，激光焊也存在如下缺点：

- 1) 焊接淬硬性材料时易形成硬脆接头。
- 2) 合金元素的蒸发会导致焊缝出现气孔和咬边。
- 3) 对工件的装配、夹持及激光束的精确调整要求比较高。

目前，单纯的激光焊成本仍然较高，因此，激光-电弧复合焊接技术得到了发展。其主要目的就是有效利用电弧能量，在较小的激光功率条件下获得较大的焊接熔深，同时利用电弧的搭桥能力降低焊接工艺对工件装配间隙的要求，实现高效率、高质量的焊接过程。

TIG-激光复合焊在高速焊接条件下，可以得到稳定的电弧，焊缝成形美观，减少了气孔、咬边等焊接缺陷的产生。尤其是低电流、高焊接速度和长弧焊时，TIG-激光复合焊的速度可达到激光焊的两倍以上。TIG-激光复合焊多用于薄板高速焊接，也可用于不等厚材料对接焊缝的焊接，焊接较大间隙板时，可采用填充金属。激光-TIG 复合焊工艺中，激光束与电弧可以是同轴复合，也可以是旁轴复合，如图 1-6-31 所示。研究表明，光束与电弧的夹角、电弧电流大小和输出形式、激光功率、排列方式、作用间距、电弧高度、保护气体流量等都会影响复合焊接的质量。

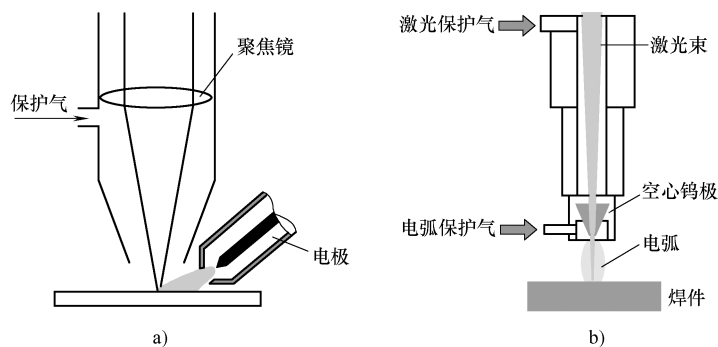


图 1-6-31 TIG-激光复合焊原理

a) 旁轴复合 b) 同轴复合

图 1-6-32 所示为激光焊与 TIG-激光复合焊获得的焊缝截面对比。单独电弧焊因电弧能量不够集中，熔宽较大，熔深较浅，深宽比较小；单独激光焊因能量集中，产生了小孔效应，熔深较大，深宽比也较大；复合焊则形成熔透充分、熔宽也大幅增加的焊缝。TIG-激光复合焊可以提高焊缝的桥接能力、增大焊接熔深。其原因是：一方面电弧对材料表面起预热作用，提高了材料的表面温度，增大了材料对激光的吸收率；另一方面激光改变了电弧热源特性，激光与电弧复合时，电弧被吸引到激光与材料的作用区，电弧中心的温度急剧升高，可达 20000K，当电弧中心与周围环境的温差越大时，焊接时电弧收缩越强烈，电弧能量得到了更进一步的集中，有利于增大焊接熔深。

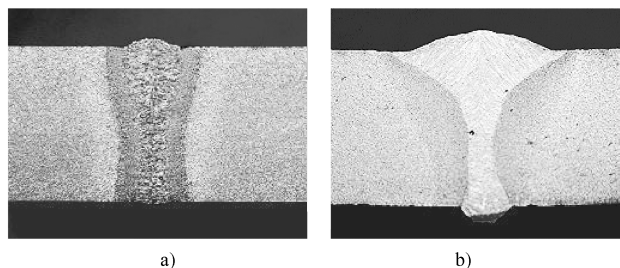


图 1-6-32 激光焊与 TIG-激光复合焊的焊缝截面

a) 激光焊 b) TIG-激光复合焊接

参 考 文 献

- [1] 黄石生. 弧焊电源及其数字化控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [2] 俞尚知. 焊接工艺人员手册 [M]. 2 版. 上海: 上海科学技术出版社, 1991.
- [3] 王宗杰. 熔焊方法及设备 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [4] 天津大学, 中国石油化工总公司第四建设公司. 金属结构的电弧焊 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [5] 姜焕中. 焊接方法及设备 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [6] 韩国明. 焊接工艺理论与技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [7] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册: 第一卷 焊接方法及设备 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [8] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册: 第一卷 焊接方法及设备 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [9] 殷树言. 气体保护焊工艺基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [10] 史耀武. 中国材料工程大典: 第 22 卷 材料焊接工程 (上) [M]. 化学工业出版社. 北京: 2006.
- [11] Kenji SHINOZAKI, Motomichi YAMAMOTO, Toshiharu NAGASHIMA et al. Study on High speed welding with Hot Wire TIG Welding Methods Using Pulsed Current to Heat filler Wire [J]. Preprints of the National Meeting of JWS, Vol. 2006f (2006): 64-65.
- [12] 陈彦宾. 现代激光焊接技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.

第 7 章 等离子弧焊接、喷涂与切割基础

等离子弧是电弧的一种特殊形式，它具有温度高、能流密度高、化学活性高和可控性好等特点。利用等离子弧来进行焊接、喷涂和切割的工艺方法分别称为等离子弧焊接、等离子弧喷涂和等离子弧切割工艺，是现代科学领域中的一项新技术。它的出现和应用发展已有较长的时间。这种新的工艺方法不仅能用于一般材料的焊接、切割和喷涂，而且还能用于难以加工的材料。本章首先介绍等离子弧的产生条件、特点和分类，然后依次介绍等离子弧焊接、等离子弧喷涂以及等离子弧切割的基本工作原理、工艺特点以及设备要求。

7.1 等离子弧的形成、特点及分类

7.1.1 等离子弧的形成

电弧是中性气体电离并维持放电的现象。若使气体充分电离，形成由数量相等的带正电的正离子和带负电的电子所组成的电离气体，就称为等离子体（Plasma）。等离子体是一种由自由电子和带电离子为主要成分的物质形态，常被视为物质的第四态，也被称为等离子态，或者“超气态”，也称为“电浆体”。等离子体具有很高的电导率，与电磁场存在极强的耦合作用。等离子体是由克鲁克斯在 1879 年发现的，1928 年美国科学家欧文·朗缪尔和汤克斯首次将“等离子体”一词引入物理学，用来描述气体放电管里的物质形态。一般的焊接电弧是一种自由电弧，弧柱的截面随功率的增加而增大，电弧中的气体电离不充分。若在保证电弧功率的同时，对自由电弧进行压缩，使其横截面减小，则电弧中的电流密度就大大提高，电离度也随之增大，这种用外部约束作用使弧柱受到压缩的电弧就是等离子弧。对自由电弧进行的压缩作用称为压缩效应。压缩效应有如下三种形式。

（1）机械压缩效应 也称为“壁压缩”效应。当弧柱电流增大时，一般电弧的横断面也会随之增大，使其能量密度和温度难以进一步提高。如果在负极和正极之间加上一个高电压，使气体电离形成电弧，当弧柱区通过特殊孔形喷嘴的同时，又施以一定压力的气体，强迫弧柱通过细孔，由于弧柱受到孔道尺寸的限制，将无法任意扩展，通过喷嘴孔道的弧柱的横截面面积缩小，能量密度得到提高，这种利用机械压缩方式来限制弧柱直径，提高能量密度的效应就称为机械压缩效应。

（2）热收缩效应 可以采用气流或者水流对电弧进行压缩。当电弧通过喷嘴的时候，在电弧的外围不断送入高速冷却气流，这些高速气流一般采用导电性和导热性均较差的中性气体（氮气或氢气等），使弧柱区外围受到强烈冷却，电离度大大降低，迫使带电粒子进一步向电离度较高的弧柱中心通过，导致导电截面进一步缩小，使得电弧的电流密度大大增加，从喷嘴中流过的等离子体具有更大的径向温度梯度，电弧得到压缩。利用气流对电弧进行压缩的热收缩效应会受到气体种类和压力的影响。当然，也可以直接采用水流对电弧进行压缩，热收缩的效应更为明显，可以得到更高温度和能流密度的等离子弧。目前，利用大功率水稳电弧，可以得到温度高达 50000K 的高能流密度的电弧。这种利用气流或者水流的冷却作用使电弧得到压缩的效应就是热收缩效应。

（3）磁收缩效应 这种收缩效应来自于弧柱自身的磁场。由于电流方向相同，在电流自身产生的电磁力作用下，彼此互相吸引，将产生一个从弧柱四周向中心压缩的力，使得弧柱直径进一步缩小。这种因导体自身磁场作用产生的压缩作用叫做磁收缩效应。电弧电流越大，磁收缩效应越

强。这种效应也称为“自磁压缩”效应。

自由电弧在上述三种效应作用下被压缩得很细，在高度电离和高温条件下，电弧逐渐趋于稳定的等离子弧。在上述三种效应中，喷嘴的机械压缩是前提条件，而热收缩则是最本质的原因。

7.1.2 等离子弧的特点

从物理上讲，等离子弧与普通自由燃烧电弧的本质相同，弧柱均由等离子体组成。但与自由电弧相比，等离子弧是压缩电弧，在实际应用中区别较大，如图 1-7-1 所示。等离子弧具有以下特点。

(1) 能量集中温度高 正是由于机械压缩、热收缩和磁收缩效应，使得等离子弧弧柱区的温度和能量密度得到了大幅度的提高。等离子弧温度可高达 24000 ~ 50000K，能量密度可达 $10^5 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。普通钨极氩弧的最高温度为 10000 ~ 24000K，能量密度一般小于 10^4 W/cm^2 。

(2) 等离子弧气氛具有可控性 它是一种纯净的热源，工作气体可根据生产需要选定而使其呈还原性、氧化性或惰性气氛，因而可用来还原铁和铁合金、熔炼废钢或精炼钢液以及用于钢包及连铸中间包钢液的加热。应用于冶金工业时，不含有任何对冶金产品有害的杂质。

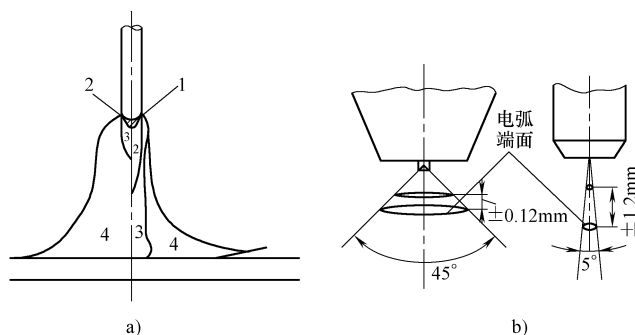


图 1-7-1 自由电弧和等离子弧的对比

a) 温度分布 b) 挺度 (左—自由电弧 右—等离子弧)

1—24000 ~ 50000K 2—1800 ~ 24000K 3—14000 ~ 18000K 4—10000 ~ 14000K

自由电弧 200A, 15V, 40 × 28 L/h; 压缩电弧 200A, 30V, 40 × 28L/h, 压缩孔径 $\phi 4.8 \text{ mm}$

(3) 等离子弧稳定性和挺度好 等离子弧温度和能量密度的显著提高使等离子弧的稳定性和挺度得以改善。自由电弧的扩散角约为 45° ，等离子弧约为 5° ，如图 1-7-1b 所示。这是因为压缩后从喷嘴口喷射出来的等离子弧带电质点运动明显提高所致，最高可达 300m/s (与喷嘴结构、离子气种类和流量等有关)。普通电弧在电流小于 10A 时就会发生电弧漂移现象，即弧柱偏离电弧轴线。这时电弧稳定性会遭到破坏，而等离子弧在 1A 以下仍可以稳定燃烧。但是，在某些因素 (如喷嘴孔径过小、孔道长度或内缩过大、钨极与喷嘴不同心、工作气体流量过小等) 作用下，等离子弧也会出现不稳定，甚至出现双弧现象。

(4) 热源成分发生变化 在普通钨极氩弧焊中，加热工件的热量主要来源于阳极斑点热，而弧柱辐射和热传导仅起辅助作用。而在等离子弧中，情况则有变化，弧柱的高速等离子体通过接触传导和辐射带给工件的热量明显增加，甚至可能成为主要的热量来源，而阳极热则降为次要地位。

7.1.3 等离子弧的分类

等离子弧按供电方式不同分为转移型弧、非转移型弧和联合型弧三种，前两种是基本形式。

电极接负极，喷嘴接正极产生的等离子弧称为非转移弧。电弧则直接在电极和喷嘴之间燃烧，

水冷喷嘴既是电弧的电极，又起冷壁拘束作用，而工件却是不接电源的。因此非转移型等离子弧又称为等离子焰。用于焊接或切割较薄的材料。

电极接负极，焊件接正极产生的等离子弧称为转移型弧。电弧在电极和工件之间燃烧，水冷喷嘴不接弧焊电源，仅起冷却拘束作用。适用于焊接、堆焊或切割较厚的材料。

电极接负极，喷嘴和焊件同时接正极，则非转移型弧和转移弧同时存在，称为联合型弧。这时需要用两个弧焊电源独立供电。转移型弧难以直接形成，必须先引燃非转移型弧，然后使电弧另一极从喷嘴转移到焊件才能成为转移型弧，这也是名称的由来。它适用于微弧等离子焊和粉末材料的堆焊。

7.1.4 对等离子弧供电特性的要求

等离子弧是一种非线性负载。相对于自由电弧，等离子弧的静态特性虽然还是呈现为 U 形，但又有明显的变化，如图 1-7-2 所示，主要表现在以下方面。

1) 由于冷壁喷嘴的拘束作用使弧柱横截面积受到限制，弧柱电场强度增大，电弧电压明显提高，U 形特性的平直区较自由电弧明显缩小，如图 1-7-2a 所示。

2) 拘束孔道的尺寸和形状对静特性有明显影响，喷嘴孔径越小，U 形特性平直区域就越小，上升区域斜率增大，即弧柱电场强度增大。

3) 离子气种类和流量不同时，弧柱的电场强度将有明显变化。因此，等离子弧供电电源的空载电压应按所用的等离子气种类而定。

4) 如果采用混合型等离子弧，转移弧 U 形特性下降区段斜率明显减小，如图 1-7-2b 所示。这是由于非转移弧的存在为转移弧提供了导电通路。小电流微束等离子弧采用混合型弧，以提高其稳定性。

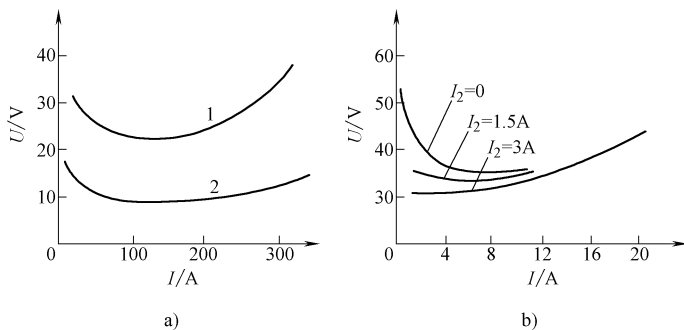


图 1-7-2 等离子弧的静特性

a) 转移弧 b) 混合型弧

1—等离子弧 2—钨极氩弧 I_2 —非转移弧电流

根据“电源-电弧”系统稳定工作的基本原理，等离子弧供电电源的外特性、动特性以及调节特性都要能够适应等离子弧负载的特点。

等离子弧的静态特性呈现为 U 形，其工作部分一般为平特性或者上升特性，普遍采用陡降特性或缓降特性弧焊电源，最好采用陡降特性电源。当弧长发生变化时，采用陡降特性电源引起的电流偏移量较小，即 $\Delta I_1 < \Delta I_2$ ，如图 1-7-3 所示。在等离子弧正常工作时，电弧应从钨极经喷嘴孔道到达焊件。但在某些特殊情况下，钨极与喷嘴之间有一个电弧，喷嘴与工件还有一个电弧，也就是说钨极到焊件间的电流通道有两个相串联的电弧，称为双弧现象。出现双弧时，会造成工艺缺陷，严重时烧毁喷嘴，需要避免。虽然喷嘴孔道的直径与长度的比值是影响双弧的最重要因素，但采用恒流特性弧焊电源，对防止双弧现象也是有利的。

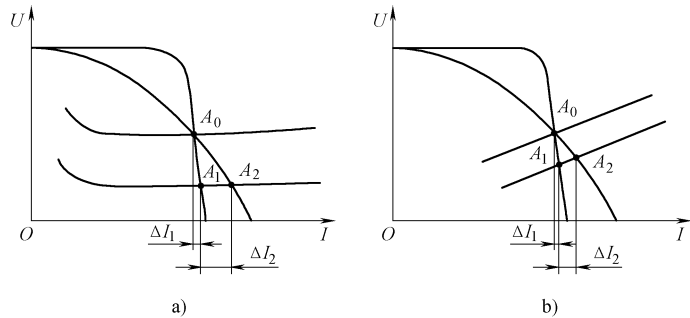


图 1-7-3 垂直陡降和缓降弧焊电源外特性在弧长变化时引起的电流偏移量示意图
a) 等离子弧为平特性 b) 等离子弧为上升特性

在等离子弧焊接、喷涂或者切割过程中，往往需要根据材料、电极直径等来选择不同的工艺参数，其中最重要的是电弧电压和电流。而电弧电压和电流的值又是由弧焊电源外特性曲线和等离子弧静特性曲线相交的稳定工作点来确定。为了获得不同的电弧电压和电流，弧焊电源的外特性必须连续和均匀可调。

等离子弧对其供电电源动特性的要求不高，因为它是一种非熔化极电弧，又常用非接触引弧方式，在工作中电极不熔化，电弧长度、电弧电压和电流基本上不发生变化。为了保持电弧稳定，供电弧焊电源的输出滤波电感量一般比较大，回路的时间常数较大。

具有下降特性的各种整流式弧焊电源，如磁放大器式弧焊整流器、晶闸管式弧焊整流器、逆变式弧焊整流器以及早期的弧焊发电机等，均可以作为等离子弧供电电源，并以逆变式弧焊整流器为主流发展方向。

7.2 等离子弧焊的原理、工艺及设备

等离子弧焊是现代科学领域中的一项新技术，它是在钨极氩弧焊的基础上发展起来的，是利用钨极和焊件之间温度高达 1500 ~ 3000℃ 的等离子弧来进行焊接的工艺方法。这种新的工艺方法不仅能对一般材料进行焊接，而且还能焊接一般工艺方法难以加工的材料。按照焊接电流极性与波形的不同，等离子弧焊可以分为直流反极性等离子弧焊、直流正极性等离子弧焊、交流等离子弧焊、变极性等离子弧焊和脉冲等离子弧焊等工艺方法。

7.2.1 等离子弧焊的原理

等离子弧焊采用惰性气体作为工作气体和保护气体，一般采用氩气，有时也加入少量其他气体，在焊接过程中可以添加填充金属，也可以直接熔化母材来形成焊缝，基本的焊接原理如图 1-7-4 所示。等离子弧焊与钨极氩弧焊方法的最大区别在于它使用电弧能量高度集中的等离子弧。自由电弧经过机械压缩、热收缩和磁收缩之后，电弧的温度和能量密度大幅度提高，能量密度相当于钨极氩弧焊电弧的 3 倍以上，成为仅次于激光和电子束的高能流密度热源。

按照所用焊接电流的大小和喷嘴孔径大小，等离子弧焊工艺可以分为以下三种不同的焊接模式。

(1) 微束等离子弧焊 焊接电流在 0.1 ~ 15A，其特

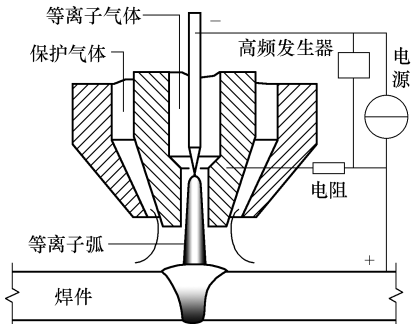


图 1-7-4 等离子弧焊原理图

点是电弧易于控制,电弧在小电流下像一个针尖一样,非常稳定,所以又称为针弧,适于焊接精密的薄件制品。

(2) 熔入法等离子弧焊 焊接电流为 15 ~ 100A,用于对焊接质量有要求的常规部件的焊接。

(3) 小孔法等离子弧焊 焊接电流一般大于 100A,是等离子弧焊的一种独特模式。焊接时,等离子弧的一部分穿透了被焊金属,形成被熔池金属环绕着的小孔,并随着小孔的移动逐步形成焊缝。小孔法等离子弧焊可以一次将不开坡口的对接接头熔透成形,一次可焊接的厚度主要取决于被焊接材料的特性、射流水平、等离子气的种类以及焊接位置等。

7.2.2 等离子弧焊的工艺

1. 等离子弧焊的工艺特点

(1) 等离子弧焊的熔透能力强 焊接速度快,温度高,能量密度集中。具有压缩特性的等离子弧,可以使得焊缝的断面成为深而窄的形状,其热影响区和焊接变形也小。该方法的生产效率高,节省焊接材料,适用于绝大多数金属的焊接,特别适合不锈钢、铝、铜、镍基合金、钴基合金、铜基合金及各种铝合金的焊接。

(2) 抗弧长波动能力好 焊缝成形美观,焊接质量好。在某些焊接条件下,等离子弧焊方法已经可以取代价格昂贵的电子束焊和激光焊。它可以用于宇航飞机液体燃料罐、气垫船和潜水艇的外壳、涡轮机叶片维修等重要零件的焊接,也可以用于像不锈钢储罐、管线等普通零件的焊接。

(3) 等离子弧的稳定性好 对弧长变化不敏感,可以焊接超薄焊件。

(4) 可以减少钨极烧损和防止焊缝夹钨 TIG 焊电弧需要保持 1.5 ~ 3mm 的电弧长度,否则很容易使钨极与熔池接触,形成短路并造成焊缝夹钨;而等离子弧焊时,电弧总长可以达到 2 ~ 10mm 甚至更长,同时,钨极内缩于喷嘴内,焊缝几乎没有夹钨的现象。

2. 等离子弧焊工艺

(1) 接头形式 通常等离子弧焊的接头形式为 I 形对接接头、开单面 V 形和双面 V 形坡口的对接接头以及开单面 U 形坡口的对接接头。

(2) 焊接参数的选择 主要需选择和匹配如下焊接参数。

1) 喷嘴的结构和孔径:喷嘴结构是否合理对等离子弧焊的稳定性起着决定性的作用。喷嘴一般采用纯铜制作,并要靠流动的水流进行冷却,冷却方式可以是间接水冷或直接水冷,采用何种方式冷却,主要取决于等离子弧焊枪许用电流的大小。绝大多数焊接枪体采用直接水冷方式,微束等离子弧焊的枪体常采用间接冷却方式。喷嘴孔径要根据工作电流和所需要的等离子气的流量来选择。喷嘴的压缩程度决定了等离子弧的能量密度,所以对于微束和中等强度焊接的“弱”等离子弧,建议采用较大孔径的喷嘴;而对于采用较大电流的小孔法焊接模式,则应采用较小孔径的喷嘴,或配合使用其他的电弧压缩技术,如环形保护气体、三孔式喷嘴技术等。

喷嘴的基本参数有喷嘴孔径 d 和孔道长度 l 。 d 的大小决定了该喷嘴所能允许的工作电流大小。当 d 一定,而 l 增大时,电弧的压缩程度会增加,此时枪体的许用焊接电流要相应减小。孔道长度 l 和喷嘴孔径 d 的比值 $\eta = l/d$ 称为孔道比,是确定等离子弧压缩程度的主要参数。 η 的大小要根据枪体的用途来选择,等离子转移弧焊接时一般取 1.0 ~ 1.2。

2) 焊接电流:在焊接过程中,根据焊件的材质和厚度首先确定焊接电流,当焊件厚度增大时,焊接电流也应增大,但不能超过喷嘴的最大许用电流。如果电流过小,可能会造成无法焊透焊件,焊接速度慢;如果电流过大,可能会造成焊穿,甚至可能会引起双弧现象。

3) 离子气种类及流量:等离子弧焊最常用的保护气体和工作气体是氩气,适用于所有金属。也可适当加入一些其他气体来提高接头效率和改善接头质量。焊接不锈钢、镍基合金以及低碳钢时,常采用氩气 + 氢气,因为氢气可以显著提高电弧电压,从而提高等离子弧的热焓值,可以提高

生产率。焊接不锈钢时，氢气的添加量一般在 1% ~ 7%（体积分数），甚至高达 15%（体积分数）。而对中碳钢、高碳钢、低合金钢、铝、铜合金则不能采用氩气 + 氢气，因为氢会在中、高碳钢和低合金钢中引起延迟裂纹，在铝和铜中引起气孔。焊接钛合金时，可以使用氢气和氦气的混合气。氩气中加入氦气能大幅度提高电弧的功率，增大熔深和提高焊接速度，并有增加焊道润湿性的能力。例如，焊接铝及铝合金时，可以在氩气中加入体积分数为 30% ~ 70% 的氦气。但是，我国氦气很稀少，价格昂贵，故只有在焊接很重要的部件时才使用。表 1-7-1 为大电流等离子弧焊常用等离子气及保护气体。

当孔径和焊接电流大小一定时，等离子气流量是一个重要参数。等离子气流速太低时，在喷嘴和工件之间容易形成“双弧”可能会烧坏喷嘴并且使焊缝质量变得很差；等离子气流量增加，等离子弧的冲力和穿透力都增大，通常会导致熔深加大。表 1-7-2 为小电流等离子弧焊时常采用的保护气体。

表 1-7-1 大电流等离子弧焊常用等离子气及保护气体

金属	厚度/mm	焊 接 方 法	
		穿孔法	熔透法
碳钢 (铝镇静钢)	< 3.2	Ar	Ar
	> 3.2	Ar	Ar 25% + He 75%
低合金钢	< 3.2	Ar	Ar
	> 3.2	Ar	Ar 25% + He 75%
不锈钢	< 3.2	Ar 或 Ar 92.5% + H ₂ 7.5%	Ar
	> 3.2	Ar 或 Ar 95% + H ₂ 5%	Ar 25% + He 75%
铜	< 2.4	Ar	He 或 Ar 25% + He 75%
	> 2.4	不推荐 ^①	He
镍合金	< 3.2	Ar 或 Ar 92.5% + H ₂ 7.5%	Ar
	> 3.2	Ar 或 Ar 95% + H ₂ 5%	Ar 25% + He 75%
活性金属	< 6.4	Ar	Ar
	> 6.4	Ar + He 50% ~ 70%	Ar 25% + He 75%

注：表中气体含量数值均为体积分数。

① 由于底部焊道成形不良，这种技术只能用于铜锌合金。

表 1-7-2 小电流等离子弧焊时常采用的保护气体（等离子气为氩气）

金属	厚度/mm	焊 接 工 艺	
		穿孔法	熔透法
铝	< 1.6	不推荐	Ar 或 He
	> 1.6	He	He
碳钢 (铝镇静钢)	< 1.6	不推荐	Ar 或 Ar 75% + He 25%
	> 1.6	Ar 或 Ar 25% + He 75%	Ar 或 Ar 25% + He 75%
低合金钢	< 1.6	不推荐	Ar, He 或 Ar + H ₂ 1% ~ 5%
	> 1.6	Ar 25% + He 75% 或 Ar + H ₂ 1% ~ 5%	Ar, He 或 Ar + H ₂ 1% ~ 5%
不锈钢	所有厚度	Ar, Ar 25% + He 75% 或 Ar + H ₂ 1% ~ 5%	Ar, He 或 Ar + H ₂ 1% ~ 5%
铜	< 1.6	不推荐	Ar 75% + He 25% 或 He 或 H ₂ 75% + Ar 25%
	> 1.6	He 或 Ar 25% + He 75%	He
镍合金	所有厚度	Ar, Ar 25% + He 75% 或 Ar + H ₂ 1% ~ 5%	Ar, He 或 Ar + H ₂ 1% ~ 5%
活性金属	< 1.6	Ar, He 或 Ar 25% + He 75%	Ar
	> 1.6	Ar, He 或 Ar 25% + He 75%	Ar 或 Ar 25% + He 75%

注：表中气体含量数值均为体积分数。

4) 焊接速度：焊接速度直接影响到焊缝的热输入，因此焊接速度取决于焊接电流和离子气流量。

5) 喷嘴高度：喷嘴端面至焊件表面的距离为喷嘴高度。一般喷嘴高度应保持 3 ~ 8mm 较为合适。

6) 保护气成分：大电流等离子弧焊时保护气应与离子气成分相同。小电流等离子弧焊时，保护气可以不同。

3. 等离子弧焊的缺陷及其防止

等离子弧焊的常见缺陷及消除措施见表 1-7-3。

表 1-7-3 等离子弧焊常见缺陷及消除措施

缺陷类型	产生原因	消除措施
单侧咬边	1. 焊枪偏向焊缝一侧 2. 电极与喷嘴不同心 3. 两辅助孔偏斜 4. 接头错边量太大 5. 磁偏吹	1. 改正焊枪对中位置 2. 调整同心度 3. 调整辅助孔位置 4. 加填充焊丝 5. 改变地线位置
两侧咬边	1. 焊接速度太快 2. 焊接电流太小	1. 降低焊接速度 2. 加大焊接电流
气孔	1. 焊前清理不当 2. 焊丝不干净 3. 焊接电流太小 4. 填充焊丝送进太快 5. 焊接速度太快	1. 除净焊接区的油、锈及污物 2. 清洗焊丝 3. 加大焊接电流 4. 降低送丝速度 5. 降低焊接速度
热裂纹	1. 焊接材料或母材含硫量太高 2. 焊缝熔深、熔宽较大,熔池太长 3. 工件刚度太大	1. 选用含硫量低的焊丝 2. 调整焊接参数 3. 预热、缓冷

7.2.3 等离子弧焊设备

等离子弧焊的焊接设备一般包括等离子弧焊焊接电源、等离子弧发生器（等离子焊枪）、供气系统以及控制系统等。在中小电流范围内的等离子弧焊既可以采用手工焊，也可以采用自动焊，而在中等以上电流范围内大多采用自动焊。采用手工焊时，控制系统比较简单；而采用自动焊时，还需要行走机构、填充焊丝送进系统以及程序控制电路等，相对较复杂。

1. 等离子弧焊电源

由于等离子弧焊焊接电源与等离子弧切割以及喷涂电源有很多共性，因此，本节重点介绍等离子弧焊接电源的种类、特点和基本工作原理。

在等离子弧供电电源输出特性方面，根据不同的等离子弧焊接工艺特点，弧焊电源可以是直流输出特性，也可以是交流或者变极性供电特性。对于直流等离子弧焊而言，具备下降或垂直下降外特性的整流式弧焊电源，如磁放大器式弧焊整流器、晶闸管式弧焊整流器、逆变式弧焊整流器以及早期的弧焊发电机均可作为等离子弧焊电源。由于传统的工频正弦波交流的正负半波过零点时间长，电弧稳定性较差，并且正负半波的通电时间不可调，需要增设稳弧和消除直流分量装置，在等离子弧焊领域应用较少，已经被电流过零点快，频率、正负半波等均可调的方波交流电源所替代，尤其是在铝及其合金焊接方面应用较多。为进一步提高铝及其合金的焊接质量，近年来，出现了一种充分融合变极性 TIG 焊和等离子弧焊优点的变极性等离子弧焊接方法（Variable Polarity Plasma Arc Welding, VPPAW），采用变极性的等离子弧焊电源，输出的正负半波电流的占空比、幅值、频率等参数均可根据工艺要求独立调节，既能够合理分配电弧热量，满足工件熔化以及阴极清理的需要，减少钨极烧损，又能够充分利用等离子弧具有的高能量密度、高射流速度以及强电弧力的特性，在焊接过程中形成穿孔熔池，实现较大厚度的铝、镁及其合金板的单面焊双面成形，焊接变形

小、生产率高、设备简单，成本较低，气孔以及夹渣等缺陷少，被称为零缺陷焊接方法，有着广泛的应用前景。

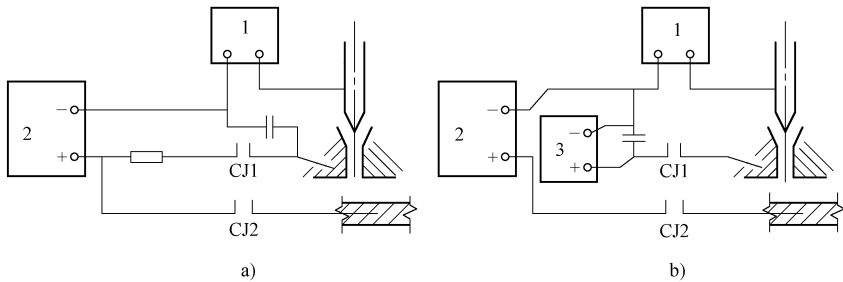


图 1-7-5 等离子弧焊接主电路结构
a) 转移型弧 b) 混合型弧
1—高频引弧器 2、3—弧焊电源

等离子弧焊主电路的结构如图 1-7-5 所示，其弧焊电源的空载电压要受到气体以及焊接热源方式的影响。用纯氩作为等离子气时，电源空载电压只需 65 ~ 80V；用氢、氩混合气时，空载电压需 110 ~ 120V。若无合适的专用电源，可用两台普通直流弧焊电源串联使用。等离子弧焊通常采用高频引弧方式。引弧时，首先由高频发生器引燃钨极与喷嘴之间的非转移型弧（也称为维弧或者导弧），然后再由非转移型弧引燃钨极与焊件之间的转移型弧。一般情况下，等离子弧焊接只用转移型弧作为焊接热源。30A 以下的小电流微束等离子弧焊接采用混合型弧，用高频或接触短路回抽引弧。由于非转移型弧（也称维弧）在正常焊接过程中不能切除，因此一般要用两个独立的电源（见图 1-7-5b）。维弧电源空载电压为 100 ~ 150V，转移弧电源空载电压为 80V 左右即可。

曾有一段时间，晶闸管式弧焊逆变器在等离子弧焊接领域应用较多。由于它的频率偏低，控制性能欠佳，有噪声干扰等，逐渐为“MOSFET、IGBT 式弧焊逆变器”所代替，应用比例逐渐减少，但在世界上仍有一定地位。

目前 IGBT 式弧焊变压器成为等离子弧焊电源的主流发展方向。IGBT 式弧焊逆变器主要包括供电系统、电子功率系统、给定反馈系统以及电子控制系统等几大部分。近年来，随着电力电子技术的发展，软开关技术已成为国内外电力电子领域的研究热点。采用软开关的工作方式，使得功率器件可以实现零电压（ZVS）开通或者零电流（ZCS）关断，器件开通和关断的损耗理想值为零，器件的工作环境得到极大改善，逆变频率和效率可以提高，逆变器的体积和重量可以进一步减小。目前，市场上已有不少采用软开关技术的焊接电源产品。

2. 气路系统

等离子弧焊机供气系统应能分别供给可调节离子气、保护气、背面保护气。为保证引弧和收弧处的焊缝质量，等离子气可分两路供给，其中一路可经气阀放空，以实现等离子气流衰减控制，图 1-7-6 所示为等离子弧焊机供气系统的实例示意图。

3. 控制系统

手工等离子弧焊机的控制系统比较简单，只要能保证预先通等离子气和保护气，然后引弧即可。自动化的等离子弧焊机控制系统通常由小行走、填充焊丝送进驱动电路及程序控制电路组

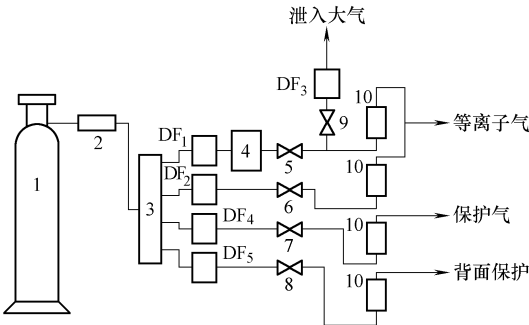


图 1-7-6 等离子弧焊机供气系统实例示意图
1—气气瓶 2—减压表 3—气体汇流排 4—储气筒
5~9—调节阀 10—流量计 DF₁~DF₅—电磁气阀

成。程序控制电路应能满足提前送气、高频引弧和转弧、等离子气递增、延迟行走、电流和气流衰减熄弧、延迟停气等控制要求。

相比传统的模拟控制方式，数字化控制技术具有更加明显的优越性，应用日益广泛。它以微处理器为控制核心，通过软硬件相结合来实现多种焊接参数的柔性设置和调节，如上升时间、下降时间、提前送气、滞后停气等均可灵活设置；焊接系统的改进升级容易，只要通过升级应用程序即可；系统维护方便，通过微处理器对信息处理识别的能力，可进行故障的自诊断，便于焊接系统的日常维护；通信能力强，由于微处理器具有多种串口通信接口或拥有 CAN 总线，甚至可扩展 TCP/IP 网络通信接口，通过数字化控制模式，可将等离子弧焊接系统与其他机构进行柔性组合，构成各种焊接专用机。

4. IGBT 型 LHM8-16 脉冲微束等离子弧焊机电路分析

IGBT 型 LHM8-16 脉冲微束等离子弧焊机是一种通用手工等离子弧焊设备，主要由弧焊电源和焊枪构成，其电气原理如图 1-7-7 所示。本焊机采用联合型等离子弧，主变压器的绕组 I 经整流桥 U1 整流，电容滤波后作为主弧和维弧电源，主弧电流大小通过 IGBT 管的开关状态来调节，开关频率为 20kHz，脉宽的调制由控制回路调节。电感 L 及续流管 V1 滤去了 20kHz 的高频，而在输出上获得恒定的直流焊接电流；绕组 II 经整流桥 U2 整流，电容滤波后和主弧叠加，作为辅助电弧的电源，帮助提高主弧的稳定性。在辅助电弧及维弧回路中均串有限流电阻及控制开关，从分流器上取得的电流反馈信号与给定电流信号比较后调节输出脉冲宽度，从而恒定焊接电流。当焊接电流大于 16A 时，过电流保护电路工作，切断 IGBT 的控制脉冲信号，同时面板的过电流指示灯亮，当消除了过电流故障后再按面板的复位按钮 SB，焊机恢复正常工作。多谐振荡器产生占空比 25% ~ 75% 的 1 ~ 20Hz 的可调方波，配合脉冲电流、低值电流调节旋钮得到所需的脉冲焊接电流。当选择 0Hz 时，焊机工作为直流焊接工作状态。焊接电流还具有缓升及衰减时间可调的功能。焊机还配有遥控插口 X1，配合其他传动装置如精密焊接工作台，可实现自动焊接。焊机还具有水流保护装置，当

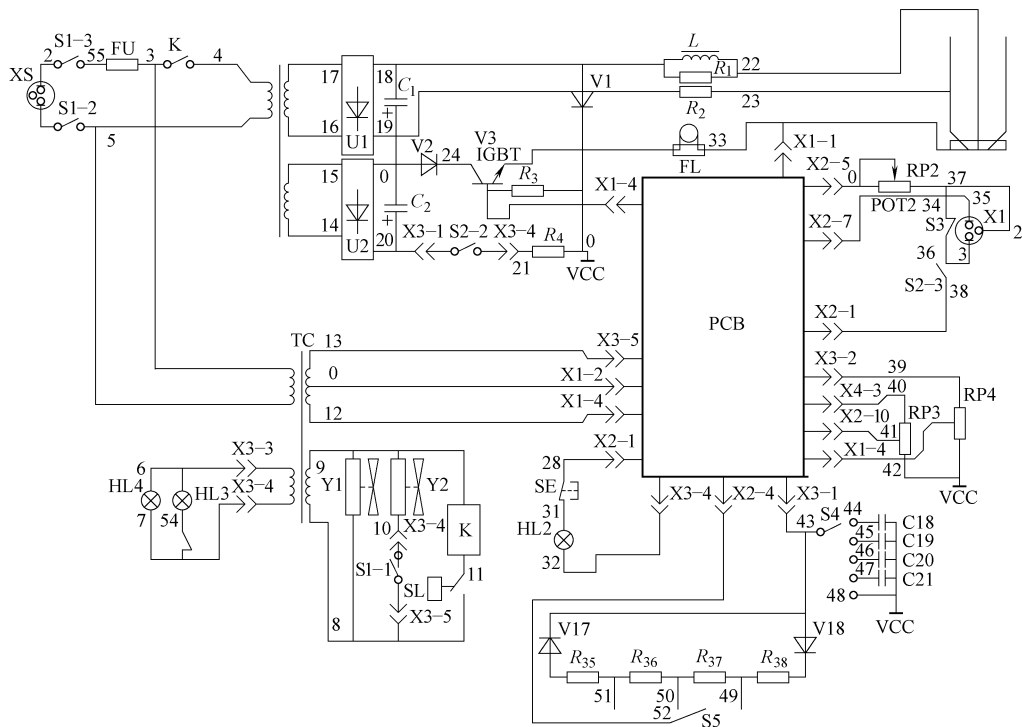


图 1-7-7 脉冲微束等离子弧焊机电气原理图

缺水及水压不足时,保护装置切断主电源,面板上水流报警灯点亮。

7.3 等离子弧喷涂的原理、工艺及设备

等离子弧喷涂技术是随着现代航空、航天技术的出现而发展起来的。等离子弧喷涂电弧温度高,焰流速度高,涂层较致密,粉末粒子的动能大,涂层结合强度高。喷涂粉末材料的范围广,生产率高。在等离子弧喷涂过程中,基体材料的加热温度一般不会超过 250°C ,比较适合大面积的机械化喷涂作业。以上这些优点使得等离子弧喷涂成为应用最广泛的热喷涂方法,约占喷涂工艺的40%以上,目前已广泛应用于航空、航天、军事、纺织、机械、电力及生物工程等各个领域。

7.3.1 等离子弧喷涂的原理

等离子弧喷涂是利用高温高速的非转移型等离子弧作为热源,在等离子弧焰流中加入金属或合金粉末,获得金属涂层和难熔合金涂层,它的工作原理如图1-7-8所示。一般采用高频引弧的方式引燃等离子弧,然后将粉末形式的喷涂材料由惰性气体携带注入等离子弧射流中,射流将其加速、加热到熔化或者半熔化状态,并喷射到基材表面,飞行的高温粒子因冲击变形以及随后的快速凝固和冷却,形成扁平化粒子,粘附在经过处理的基体表面,这些扁平化粒子的不断堆积就形成了涂层。

根据不同气氛、不同压力以及不同的介质,等离子弧喷涂方法可以分为多种类型,如图1-7-9所示。在喷涂过程中,基材温度可保持在 250°C 以下,并不会变形和引起基材组织变化,因此,不仅可对金属基材进行表面喷涂,而且对于低熔点材料,甚至易燃材料(如木材、塑料、碳和硼的纤维等)也能喷涂。等离子弧在等离子喷枪中水冷喷嘴的机械压缩、热压缩以及磁收缩等效应的作用下,等离子射流的核心温度高达 32000°C ,速度在 2000m/s 以上,能量密度接近 $10^5\text{W}/\text{cm}^2$,仅次于激光和电子束,使得最难熔的材料(如熔点高达 3875°C 的碳化钽)也能在等离子射流中熔化并喷涂成形。等离子弧喷涂已成为所有热喷涂方法中适用材料种类最多,应用范围最广,创造产值最高的方法。

粉末涂层材料被非转移弧熔化并从喷涂枪口喷出以后,在高速气流作用下喷散成雾化颗粒,并撞击到工件表面,被撞扁的细颗粒就嵌塞在已经粗化处理的清洁表面上,然后冷却并与母材结合。喷涂的粒子在撞击基体或先期到达的扁平粒子过程中,以及在随后的快速凝固期间,粒子与凹凸不平的基体表面或者扁平粒子之间可以形成紧密的接触,它的结合机理主要有以下三个方面:

1) 这种接触本身形成钩锁锚的机械结合,加上涂层的横向收缩应力,会加强机械结合效应。

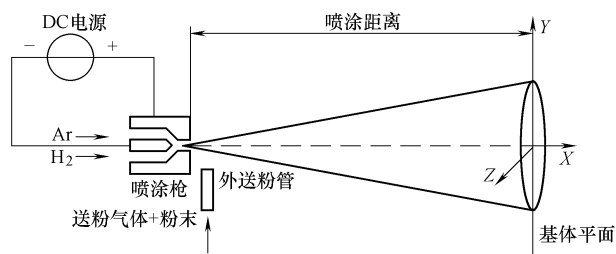
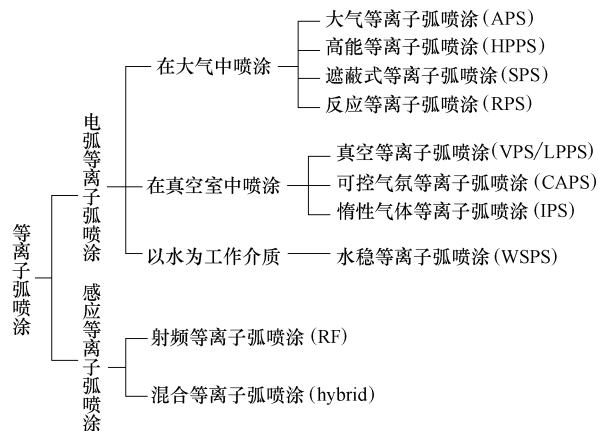


图 1-7-8 等离子弧喷涂原理示意图



2) 相互接触的距离若接近原子尺度, 可以发生扩散或合金化, 有时也可以导致金属间化合物或者新的固溶体的出现, 并可能造成接触表面的局部熔化, 即产生冶金-化学型结合。

3) 在相互接触的微区连接处, 会发生物理吸附和化学吸附。

由于受检测手段的局限, 目前还不能对涂层结合机理作出十分清楚的解释, 但如果基体温度始终保持在 150℃ 以内, 则等离子弧喷涂涂层与工件表面的主要结合机制是这种钩锁锚的机械结合。这种喷涂层和工件表面并不发生焊接作用, 而只是机械结合, 喷涂层不是很致密, 总是带有一些小孔。但喷涂钼、铌、钽、镍 + 铝、镍 + 钛等金属粉末时, 可以观察到喷涂颗粒与母材有冶金焊合, 这类材料被称为自结合材料。

7.3.2 等离子弧喷涂的工艺

等离子弧喷涂方法具有以下鲜明的工艺特点。

1) 等离子弧温度高, 几乎可喷涂所有材料, 既可以对非金属基材进行喷涂, 又可以喷涂金属或非金属碳化物、氧化物、硼化物、氮化物、硅化物涂层, 应用范围广。

2) 喷涂层致密, 结合强度高, 喷涂生产率高。目前涂层与基体的结合强度已经高达 20 ~ 70MPa, 可以满足绝大多数工业应用的需求。

3) 用惰性气体保护, 涂层质量好, 致密度好, 效率高。

4) 工件基体加热温度低, 一般在 200℃ 左右, 最高不超过 500℃。

5) 涂层质量对粉末材料有很大的依赖性。

采用非转移弧的粉末等离子弧喷涂, 在材料保护领域有着十分广泛的应用。但是, 如何保证足够的涂层结合强度以及比较低的孔隙率, 一直是等离子弧喷涂工艺中需要重点关注的问题。经过多年的科学研究, 有关涂层质量、沉积效率与喷涂工艺参数的关系已经比较清楚, 图 1-7-10 列出了多个对于喷涂质量有重要影响的工艺参数, 以及它们之间的相互关系。由图 1-7-10 可见, 粉末特性、设备和工艺参数以及预处理情况均对喷涂质量产生较大影响, 本节将对这些影响因素进行阐述。

1. 粉末材料方面

等离子弧喷涂所用的材料几乎都为粉末形式, 金属、自熔合金、金属化合物、碳化物、氧化物、陶瓷、塑料以及玻璃等均可作为等离子弧喷涂材料。为了获得各种使用要求的喷涂层, 选用合适的粉末材料是关键。等离子弧喷涂所用的粉末材料应该具有稳定的化学成分和性能, 以提供涂层特定要求的性能, 如硬度、耐蚀性和耐热性等, 此外, 还应该具有适当的结构外形和粒度, 以满足不同的等离子弧喷涂工艺的要求。

目前粉末材料正在向系列化方向发展。喷涂粉末的结构形式、外形和粒度因制粉方法的不同而分成多种类型, 主要包括以下几种类型:

(1) 自熔性合金粉末 有镍基、铬基、铁基三类。前两类具有良好的抗磨、耐蚀、抗冲刷、

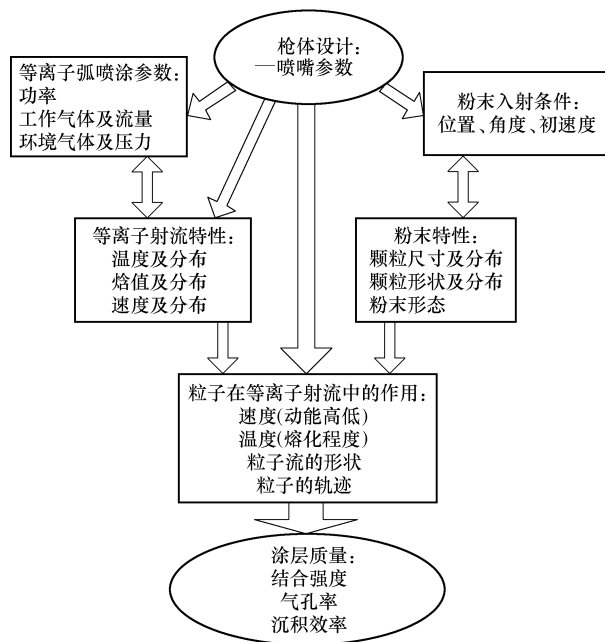


图 1-7-10 等离子弧喷涂工艺参数之间的关系

抗氧化、抗高温等综合性能，是目前应用的主要抗磨抗蚀的喷涂粉末。铁基粉末在耐蚀、抗高温性能方面目前还不如前两类，但其抗磨性非常好，是一种很有发展前途的粉末。

(2) 包覆粉末 一种核心粉末外包裹一层或多层金属或合金材料而制成。核心粉末可为金属或非金属化合物，包覆层可为镍、钴、铜、铝等，例如用镍铬包覆碳化铬粉末可制成高温耐磨的喷涂材料。

(3) 微细粉末 一般喷涂粉末的粒径为 0.045 ~ 0.100mm (150 ~ 320 目)，为了得到更致密均匀的涂层，可以采用更微细的粉末，其粒度为一般喷涂粉末的几分之一到几十分之一。

为保证喷涂过程粉末的流动性，粉末的形状以球状为佳。不规则的粉末很难输送。至于粉末的粒度，则需要根据喷涂方法、粉末熔点以及对涂层的不同要求来选择。当喷涂功率较大时，可以采用较大粒度和较高熔点的粉末；而对于熔点和沸点较低的材料，则不宜采用较小粒度的粉末；当要求涂层很薄的时候，喷涂粉末的粒度也应适当减小。此外，粉末粒度不同，喷涂层的表面粗糙度也不同，细小粉末会使涂层表面粗糙度更小。根据粉末特征的不同，对应的等离子弧喷涂工艺也有所区别。

2. 设备和工艺参数

等离子弧喷涂采用非转移弧，只需一个弧焊电源，弧焊电源的供电特性及空载电压均与等离子弧焊电源类似。等离子弧喷涂设备的主要工艺参数有电流、电压、离子气和送粉气流量、喷嘴高度、粉末入射条件等。表 1-7-4 为等离子弧喷涂的典型参数。

表 1-7-4 等离子弧喷涂的典型参数

粉末材料		电弧电参数		氩气流量/(L/h)			喷嘴高度 /mm
成分	粒度/mm(目)	电压/V	电流/A	离子气 I	离子气 II	送粉气	
钴铬粉	0.056 ~ 0.100 (150 ~ 260)	1500 ~ 1800	25 ~ 50	250 ~ 300	400 ~ 600	450 ~ 600	85 ~ 130
铁铬硼硅铁粉	150 ~ 260	25 ~ 50	250 ~ 300	400 ~ 600	1500 ~ 1800		80 ~ 150
铁粉镍包铝		25 ~ 50	250 ~ 300	400 ~ 600	1500 ~ 1800		80 ~ 150
氧化铝		25 ~ 50	250 ~ 300	400 ~ 600	1500 ~ 1800		60 ~ 80

电弧功率的高低是等离子弧喷涂能力最主要的标志。等离子弧喷涂使用非转移弧，其有效功率与等离子弧焊接或者切割相比要小许多，一般仅占电弧总功率的 40% ~ 58%，而其中又只有约 1/5 的能量用于加热喷涂粒子和工件。但是，如果从对工件加热的角度来说，低能量输入使工件不易快速升温，对等离子弧喷涂又是有利的。在功率相同的情况下，利用较高的电弧电压可以得到高的等离子弧射流焓值，可以更好地熔化喷涂粒子，由于电弧电压高，电流较小，可以降低电极的负荷，减少烧损。而高的电弧电压除了与枪体的结构有关之外，主要取决于工作气体的种类和流量。

在等离子弧喷涂过程中，等离子射流的焓值代表了射流加热喷涂材料的实际能力，而气体的焓值除了取决于温度之外，又主要由气体的种类来决定。氮气是等离子弧喷涂常用的气体，对大多数喷涂材料显惰性，有时也会采用氢气来作为它的辅助气体。氮气和氢气是双原子气体，其电离需要更多的能量，电离过程的平衡会使得电弧获得电源提供的更多的能量，因此，对给定温度的等离子体而言，它们要比单原子的氩气和氦气含有更高的能量，热焓值更高。氩气也是最常用的等离子气体，对所有的喷涂材料都是惰性的，对电极的烧损也小，因此多数的等离子弧喷涂使用纯氩为主气，然后以少量的氢气或者氮气为辅助气体来提高等离子射流的能量。对喷涂粒子的加热还与等离子体的热导率有关，热导率越大，说明传热的能力越高。气体流量关系到对电弧的压缩程度、射流速度的大小和温度的高低。功率一定时，流量过小会导致射流温度高，而射流速度低，这时送粉比较容易；流量过大时，射流速度提高，但温度会降低，同时噪声会增强，粉末送入难度加大。

粉末的入射条件会影响到涂层的质量。进入等离子射流的粉末，在冲击基体表面之前，要经过

等离子射流区域,该区域内的温度、焓值和速度都是随距离和位置而变化的。其中,射流的温度场影响到粉末的加热温度,焓值影响到粒子能够得到的热量,速度场则影响到粒子的运动行为。它们之间的交互作用最终决定了粒子撞击到工件表面时的温度和速度。粉末入射可以采用轴向送粉、内送粉和外送粉三种方式。轴向送粉是最为理想的送粉方式,但是枪体结构设计难度很高,并且粉末容易敷于喷嘴内壁,影响喷涂过程;采用内送粉方式有较好的粉末入射条件,粉末能直接进入射流核心区,容易得到更多的热量和动能,熔化充分,粉末沉积率高,涂层质量会好于外送粉,但是枪体结构比较复杂,并且送粉口容易堵塞;外送粉方式的粉末加热不如内送粉好,沉积率低,但是结构简单,方法灵活,喷涂常规合金或熔点不很高的材料,可以得到优质的涂层。

3. 基体表面预处理

基体待喷表面的温度、洁净度和粗糙度等对涂层的质量有直接影响。基体温度越高,越有利于粒子的扁平化和材料间的扩散,可以提高结合强度,但是工件会有氧化和变形的危险。洁净的表面是良好结合的基础。适当的表面粗糙度可以提供表面压应力,增大结合面积,更易于提高涂层与工件的结合强度。为提高涂层结合强度,必须对工件表面进行预处理,以除去表面氧化膜、锈蚀、油污以及其他杂质,并形成粗糙的新鲜金属表面。常用的方法有用煤气及三氯乙烯除油、喷砂、电火花拉毛、滚花、车沟等,并对喷涂表面进行预热(80~200℃),目的是使工件产生预膨胀,以减小工件与涂层之间的热应力,还可以去除工件表面的湿气。

7.3.3 等离子弧喷涂的设备

等离子弧喷涂设备主要由等离子弧喷涂电源、等离子弧喷涂枪、控制柜、送粉器、供气系统以及冷却装置等构成,如图1-7-11所示。目前,等离子弧喷涂设备正朝着电源的大功率小型化、喷枪的高效大功率和等离子弧喷涂过程的智能化控制方向发展。国外生产等离子弧喷涂设备的公司主要有瑞士的 Sulzer Metco 公司、美国的 PRAXAIR 公司、德国的 GTV 公司等,国内则以北京航空制造工程研究所为代表。

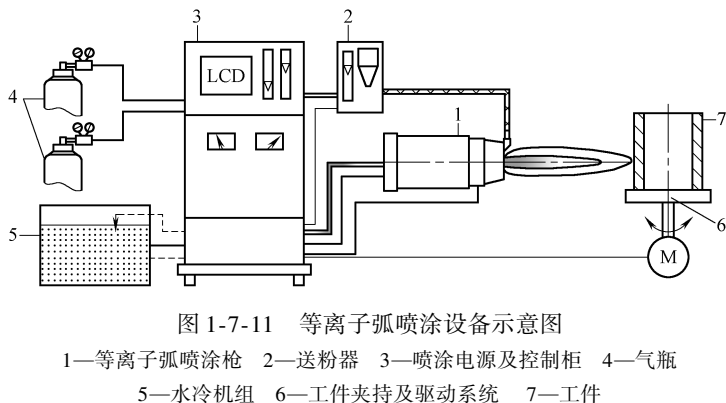


图 1-7-11 等离子弧喷涂设备示意图

1—等离子弧喷涂枪 2—送粉器 3—喷涂电源及控制柜 4—气瓶
5—水冷机组 6—工件夹持及驱动系统 7—工件

等离子弧喷涂电源为整个喷涂过程提供能量,其工作电流和电压是影响涂层质量的重要参数。等离子弧喷涂工艺对电源的要求与等离子弧焊接相类似。为确保获得优良的涂层性能,等离子弧喷涂电源首先要能够提供足够的能量,工作电压高、电流大;其次,应该具有陡降的恒流外特性,这可通过加电流反馈控制来实现;此外还需要具有良好的动特性。等离子弧喷涂电源的逆变化是其主流发展方向。

等离子弧喷涂枪集所有喷涂资源(电、气、粉、水)于一体,是等离子弧喷涂设备的核心装置。目前,国内外普遍使用的还是中等功率,送粉方式为枪外送粉,控制方式较单一的等离子弧喷涂设备。图1-7-12所示为一种外送粉方式的等离子弧喷涂枪结构简图。它主要由枪体阴极组件、

枪体阳极（喷嘴）组件和绝缘体构成，此外还包括送粉管件、供气管件、水管、电缆及其接口件等。喷枪设计的好坏，直接影响涂层的质量。等离子弧喷涂枪按功率大小可以分为：内孔型枪体，功率一般在 40kW 以下；标准型枪体，功率一般在 40 ~ 80kW；高能型枪体，功率在 80 ~ 200kW；超级、水稳型枪体，功率在 200kW 以上，国外研制了一种气体隧道型高功率等离子弧喷涂枪，功率可达到 450kW 以上。表 1-7-5 为国外部分比较典型的等离子弧喷涂枪。

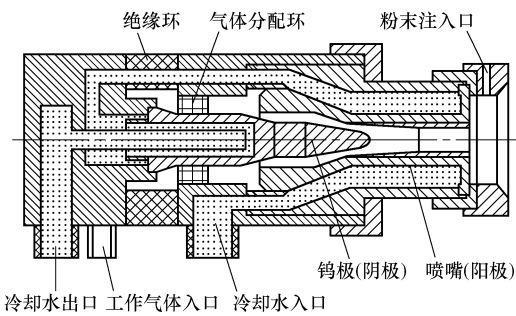


图 1-7-12 等离子弧喷涂枪结构简图

表 1-7-5 国外部分比较典型的等离子弧喷涂枪

型号	类型	功率/kW	特点	制造厂
F4- HB	手持外圆枪	40 ~ 60	适用于所有气体	PT 公司
H4- MB	机装外圆枪	40 ~ 60	电极寿命长	PT 公司
F4- Lavall	低压喷枪	—	适用于 $\phi 38\text{mm}$ 以上	PT 公司
SM- F1	中内孔	—	适用于 $\phi 8\text{mm}$ 以上	PT 公司
SM- F2	小内孔	—	—	PT 公司
METCO 9MB	手持外圆枪	< 80	冷却效果好	METCO
METCO 10MB	机装外圆枪	< 88	喷嘴, 电极寿命长	METCO
METCO 11MB	中内孔	—	—	METCO
SG- 100	机装外圆枪	80	—	Plasmadyne
Mini- Gun11	中内孔	40	—	Plasmadyne
Meclel	小内孔	40	—	Plasmadyne
NPG- 100	机装外圆枪	100	功率大	ブテスメイト公司

控制柜是整个喷涂系统的调控中心，它要稳定可靠地运行和监控并显示喷涂程序，并准确地调节电、气、粉以及运动机构的各个参数。传统控制柜一般采用继电器控制方式，目前较多采用 PLC 控制或者微处理器控制。等离子弧喷涂过程是一个极其复杂、非线性的过程，将数字化与智能控制技术相结合，实现对等离子弧喷涂过程的实时监控是等离子弧喷涂设备未来的发展方向。

送粉器是为等离子弧喷涂枪提供粉末的输送装置，主要的性能指标有装粉容量、送粉速率、送粉精度、可送粉末的粒度等。一般采用单筒式送粉器，也可以采用双筒式送粉器同时输送两种粉末，用于喷涂复合涂层或者制造功能梯度材料。

冷却装置主要为喷涂枪提供充足的冷却介质，以保证喷涂枪能够稳定工作，可以采用配有循环泵的水箱作为冷却装置，也可以选用配有制冷装置的专用冷却系统。

供气系统主要由气源、减压表、气体流量计和可控气阀组成。等离子气一般要有两路，分为主工作气体和辅助气体，两路气体的混合应在计量之后、进入喷涂枪之前完成。送粉器也需要供气系统提供气体来输送粉末。

此外，为可靠引燃等离子弧，一般采用高频引弧装置进行引弧。

7.4 等离子弧切割的原理、工艺及设备

等离子弧切割是一种常用的金属和非金属材料切割方法。它是利用高速、高温和高能的等离子气流来加热和熔化被切割材料，并借助内部的或外部的高速气流或水流将熔化材料排开直至等离子气流束穿透背面而形成切口的一种电弧切割方法。从原理上来说能切割几乎所有材料。

7.4.1 等离子弧切割的原理及特点

等离子弧切割是一种典型的热切割方法，它的工作原理如图 1-7-13 所示，既可以采用氧化切割方式，也可以采用熔化切割模式，或者两种模式共存。但由于等离子弧柱的温度远远超过所有金属以及非金属的熔点，因此等离子弧切割过程主要靠熔化来切割，因而比气割方法的适用范围更广，可用于切割那些用气割无法切割的材料，如不锈钢、有色金属等；相对于激光切割，等离子弧切割设备和工作成本也比较低，并且也能够达到很高的切割质量和精度。目前，等离子弧切割方法已经从最初只用于切割难熔金属、高合金钢或有色金属，发展成为具有广泛意义的先进的金属切割方法。

使用非转移等离子弧可以切割非金属材料，也可以高速切割很薄的金属板；而使用转移型等离子弧时，被切割的材料必须是导电的金属或合金。等离子弧切割方法的主要特点有以下方面：

① 应用面广，适用于切割多种材料，特别适用于不锈钢、有色金属和难熔金属的切割。

② 等离子弧的热量集中，被切割材料的热输入低，切割件的热变形小。

③ 切割速度快，生产率高，如切割 10mm 厚的铝板，切割速度可达 300m/h；切割同样厚度的碳钢时，其切割速度是气割的 5~7 倍。

④ 不需要对切割起始点进行预热，可以节约切割时间。

⑤ 可切割的材料厚度范围大，可在 0.1~250mm 之间，主要与切割设备的能力和切断方式有关。

⑥ 切口质量好，使用精细等离子弧或水射流等离子弧切割可以获得很高的切割质量。

等离子弧切口表面存在 0.25~3.80mm 厚的熔化层，但切口表面化学成分未变。如切割镁的质量分数为 5% 的铝合金时，虽有 0.25mm 的熔化层，但成分未变，也未出现氧化物，用切割表面直接进行焊接也可得到致密的焊缝。切割不锈钢时，由于受热影响区很快通过 349℃ 的临界温度，使碳化铬不会沿晶界析出，因此不会影响不锈钢的耐腐蚀性。

7.4.2 等离子弧切割的方法及工艺

1. 等离子弧切割方法

按照转移型等离子弧切割使用的介质以及工作环境，可以将等离子弧切割分为等离子空气切割法、等离子氧气切割法、等离子氮气切割法、等离子氩-氢气切割法、等离子氮气/氧气水射流切割法、水下等离子弧切割法以及精细等离子弧切割法等几大类；也可以将只使用气体作为切割介质的切割方法统称为干法切割，而将在水中切割或者利用喷射水来进一步压缩气体等离子弧的切割方法称为湿法切割。下面介绍几种常用的等离子弧切割方法。

等离子空气切割法以干燥的压缩空气为离子气体，主要用于切割碳钢。由于空气中含有约 21%（体积分数）的氧气，切割碳钢时，切口中的氧气与炽热的铁产生剧烈的放热反应，为切割提供了附加的热量，同时生成表面张力低、流动性好的熔渣，改善了切口中的熔融金属的流动性，因此不但切割速度较快，而且切割面较光洁。切割不锈钢和铝时，会产生严重的氧化，切割面较粗糙，并且会影响后续的焊接质量，因此只在某些对表面质量要求不高的场合应用。由于空气是地球

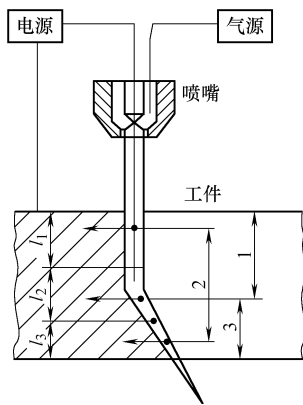


图 1-7-13 等离子弧切割原理

l_1 —弧切割区的长度 l_2 —活性斑点切割区的长度 l_3 —等离子火焰切割区的长度

1—弧柱作用区 2—活性斑点作用区
3—等离子火焰作用区

上最易得到和最廉价的气体，因此，等离子弧空气切割法是最经济的金属切割方法之一，也是目前应用量最大的等离子弧切割方法。

等离子氧气切割法以氧气作为工作气体，主要用于切割碳钢、铝。氧的电离热高、携热性好，粒子复合时的放热量大，投入切割的热量多，因此可获得较高的切割速度。与等离子空气切割法相比，等离子氧气切割法在切割碳钢时，切割速度更快，切割面更光洁，呈金属光泽，尤其是无氮化层，切割后可直接用于焊接，切割变形小，精度高，电极烧损更快，切割面斜角较大。

等离子氮气切割法以氮气作为工作气体，主要用于切割不锈钢。氮的导热性和携热性较好，弧柱也较长，因此具有较高的切割能力。但切割的表面质量不是很好，且切割面有氮化物，这种切割方法一般只用于对切割表面质量要求不高且不直接用于焊接的不锈钢下料。

等离子氩 + 氢气切割法以 Ar 和 H₂ 的混合气体作为工作气体，主要用于切割不锈钢和铝。等离子弧稳定、能量密度高，切割能力强，切口宽度和切割面斜角较小，切口光洁，切割中产生的氮氧化物较少，是等离子切割中切割质量较好的一种方法，主要用于切割其他等离子切割无法加工的、对切口要求较高的较厚不锈钢和铝工件。

等离子氮气/氧气水射流切割法是依靠水射流来进一步压缩以氮气/氧气为工作气体的离子射流，来获得更高切割效率的方法，主要用于切割不锈钢和铝。工作气体通过涡流环形成涡旋气流，使等离子流也以涡旋方式射向工件，从而可获得一个斜角极小的切割边。在工作气体的周围，是经过处理的高压水流，使电弧能量密度大大提高，形成了温度极高、挺度好及流速大的等离子弧。与其他等离子切割方法相比，等离子氮气/氧气水射流切割法具有切割速度快、切割质量好、切割变形小、精度高以及喷嘴寿命长的优点，并且适合水下加工，基本无烟尘和弧光，噪声低。

精细等离子弧切割方法是由日本的研究人员在 20 世纪 90 年代首先开发出来，它的主要技术在于：采用高电压和小的喷嘴孔径；使用环形磁场聚焦、压缩并旋转电极上的弧根，使电弧更加稳定，并使电极的烧损更均匀，寿命更长，避免了影响切割质量的偏弧问题；采用超高速旋转的二次压缩气流，使射流直径在长度方向更加均匀，降低了切口面的倾斜角；切割枪体带有陶瓷材料制成的外喷嘴，能有效防止双弧的产生，同时可以降低喷嘴高度，提高切割能力和切口精度，可有效保护内喷嘴。通过这些技术措施，可以获得更高的压缩程度和直径更细的等离子射流，能量密度得到进一步提高，可以直接加工尺寸误差很小的零部件，并且省去一般的后续加工工时和费用。

2. 等离子弧切割工艺及参数选择

(1) 等离子气种类与流量 等离子弧切割需要的等离子气主要包括切割气体和辅助气体。等离子气的种类根据切割材料的种类、厚度和所使用的切割方法来确定。目前常用的等离子气有氩气、氮气、氧气、空气以及氮 + 氢、氮 + 氩等。氮、氢、氩任意两种气体混合使用都比用单纯的一种气体效果好（见表 1-7-6），其中尤以氩 + 氢混合气体、氮 + 氩混合气体切口质量较好。

气体流量是极为重要的参数，足够的流量是保证正常切割过程和切口质量重要条件，但气体流量过大，会因冷气流带走大量热量，反而使切割过程不稳定。

表 1-7-6 等离子弧切割参数

工件厚度/mm	气体种类(体积分数)	空载电压/V	切割电压/V	切割情况	备注
≤120	N ₂	250 ~ 350	150 ~ 200	可以	常用
≤150	N ₂ + Ar(N ₂ 10% ~ 80%)	200 ~ 350	120 ~ 200	很好	切口较好
≤200	N ₂ + H ₂ (N ₂ 50% ~ 80%)	300 ~ 500	180 ~ 300	尚好	大厚度切割用薄、中、
≤200	Ar + H ₂ (H ₂ 约 35%)	250 ~ 500	150 ~ 300	很好	厚板都可以用

(2) 电流和电压 切割电流和电压是最重要的切割工艺参数，电流、电压提高时，等离子弧功率提高。切割电流直接决定了切割的厚度和速度，即切割能力。但随着电流增大，一方面切割能力增强，但同时等离子弧的弧柱变粗，切口加宽，电流过大时还会使喷嘴的热负荷增加，易使喷嘴烧损。此外，随切割厚度增加，电流对切割速度的影响减小，因此切割大厚度工件时以提高切割电压更为有效。

在电流一定的情况下，切割电压的提高意味着电弧焔值的提高和切割能力的提高。等离子弧切割设备通常有比较高的空载电压和工作电压，在使用电离能高的气体如氮气、氢气或空气时，稳定等离子弧所需的电压会更高。切割电压虽可借增加气体流量或调整气体混合比来提高，但一般超过空载电压 2/3 时，电弧就难以稳定。因此，为提高切割电压，必须选用空载电压较高的电源，一般等离子切割电源空载电压均不低于 150V。

(3) 切割速度 针对不同的材料和板厚，其切割速度通常有一个最佳的范围。在功率不变的前提下，提高切割速度能使切口变窄、热影响区减小，但切割速度太快时会使切割的热输入低于所需值，切口中的射流不能快速地将熔化的切割熔体立即吹掉而形成较大的后拖量，切割后拖量的出现往往伴随着切口的挂渣，降低切割质量，甚至不能割穿工件。速度太慢，不仅生产效率降低，并造成切口表面粗糙不平的底部熔瘤增多，清除困难，热影响区和切口宽度增加，甚至会导致电弧熄灭。因此，应在保证切透的情况下尽可能选用大的切割速度。

(4) 喷嘴高度 由于等离子弧切割一般使用恒流或者陡降外特性电源，喷嘴高度增加之后，电流变化很小，但会使弧长增加并导致电弧电压增高，从而使电弧功率增加，但同时也会使暴露在环境中的弧长增长，弧柱损失的能量增加。在这两个因素综合作用下，有效的切割能量甚至会减少，导致切割能力降低。主要表现在切割射流的吹力减弱、底部熔瘤增多、切割质量变坏；同时，由于射流直径在离开割炬枪口之后会向外膨胀，喷嘴高度增加会引起切口的宽度增加；此外，还会增加双弧形成的可能性。但是喷嘴高度过低，易导致喷嘴过热和短路。在实际应用过程中，喷嘴高度一般为 8 ~ 10 mm。如果采用陶瓷喷嘴，喷嘴高度可以设为零，即喷嘴端面可以直接接触切割表面。割炬应垂直于工件表面，为有利排除熔渣，也可稍带一定的后倾角。

良好的切割质量，应是切口表面光洁、切缝窄、顶部边缘呈方形、底部边缘无熔瘤及热影响区小等。等离子弧切割往往切口面稍微倾斜，即顶部较底部切除较多的金属。顶部边缘有时会略带圆角。板厚在 25 mm 以下的不锈钢或铝，用小电流等离子弧切割可获得平直度很高的切口，8mm 以下板材切口不需加工即可直接焊接，这在大厚度大电流等离子弧切割中是难以做到的。不锈钢切割是因其熔化金属流动性差，切口熔化金属不易从切口中排除；又因其导热性差，切口底部过热，使切口内残留的熔化金属易和切口底部熔合成一体，冷却后形成难以除去的熔瘤或毛刺，而在切割铜、铝合金时，因其导热性好，熔瘤即使产生也很容易去除。为防止不锈钢切割时形成熔瘤，应注意保证钨极与喷嘴的同心度，以防止等离子弧和气流力的对称性受到破坏，使等离子弧偏吹，切口不对称，同时采用足够高的等离子弧功率以及合适的气流量和切割速度，以保证足够的热量使金属熔化且流动性好，易于被等离子气流吹走，切口质量得到改善。表 1-7-7 为各种不同厚度材料的等离子弧切割工艺参数。

表 1-7-7 不同材料等离子弧切割工艺参数

材料	厚度/mm	喷嘴孔径/mm	空载电压/V	切割电流/A	切割电压/V	N ₂ 气体流量/(L/h)	切割速度/(m/h)
不锈钢	8	3	160	185	120	2100 ~ 2300	45 ~ 50
	20	3	160	220	120 ~ 125	1900 ~ 2200	32 ~ 40
	30	3	230	280	135 ~ 140	2700	35 ~ 40
	45	3.5	240	340	145	2500	20 ~ 25

(续)

材料	厚度/mm	喷嘴孔径/mm	空载电压/V	切割电流/A	切割电压/V	N ₂ 气体流量/(L/h)	切割速度/(m/h)
铝合金	12	2.8	215	250	125	4400	784
	21	3.0	230	300	130	4400	75~80
	34	3.2	240	350	140	4400	35
	80	3.5	245	350	150	4400	10
纯铜	5	—	—	310	70	1420	94
	18	3.2	180	340	84	1660	30
	38	3.2	252	304	106	1570	11.3
低碳钢	50	10	252	300	110	1230	10
	85	7	252	300	110	1050	5
铸铁	5	—	—	300	70	1450	60
	18	—	—	360	73	1510	25
	35	—	—	370	100	1500	8.4

7.4.3 等离子弧切割设备

除了不用保护气体和电源空载电压较高外，等离子弧切割设备与等离子弧焊接设备大致相同，主要由等离子弧切割电源、割炬、控制系统以及气路和水路系统等构成。

7.5 等离子弧焊新技术

7.5.1 微束等离子弧焊技术

通常将焊接电流在 30A 以下的熔入型等离子弧焊称为微束等离子弧焊。微束等离子弧是等离子弧的一种。在产生普通等离子弧的基础上采取提高电弧稳定性措施，进一步加强电弧的压缩作用，减小电流和气流，从等离子弧焊枪喷射出针状细小的等离子弧。主要用于焊接厚度 1mm 以下的超薄、超小、精密的焊件。

为了保持小电流时电弧的稳定，一般采用小孔径压缩喷嘴（ $\phi 0.6 \sim \phi 1.2\text{mm}$ ）及联合型电弧。即焊接时存在两个电弧，一个是燃烧于电极与喷嘴之间的非转移型弧，主要用于引弧和维弧；另一个为燃烧于电极与焊件之间的转移型弧，主要用于焊接。由于喷嘴的拘束作用和维弧电流的同时存在，使小电流（可小于 0.5A）的等离子弧可以十分稳定，目前已成为焊接金属薄板的有效方法，最小可焊厚度可达到 0.01mm，并且弧长在很大范围内变化时也不会断弧，焊接速度快，焊缝窄，焊接质量好。

由于是在小电流条件下，无论是等离子弧的形态、稳定性及其对弧焊电源、设备的要求，还是焊接工艺过程及其操作方法，都有一系列的特殊性。作为微束等离子弧的电源，除了要符合普通等离子弧供电电源的特性之外，还要有更高的空载电压。由于微束等离子弧的电流小（ $< 30\text{A}$ ），电弧气体介质质点的电离、发射作用较弱，为便于引弧和稳弧，就需要提高空载电压来加强场致发射作用。一般等离子弧焊电源的空载电压是 80~100V，微束等离子弧的电源空载电压应是 120~160V，甚至高达 200V。微束等离子弧焊电源使用时是采用正极性接法，一般采用氩气作为工作气体。微束等离子弧焊的焊接参数主要是焊接电流、焊接速度、工作气体流量、保护气体流量、电弧长度、喷嘴直径、喷嘴通道比和钨极的内缩量等，它们对焊缝的形状和焊接质量都有影响。为了保

证焊接质量,还应采用精密的装焊夹具保证装配质量和防止焊接变形。工件表面的清洁工作也应给予特别重视。

7.5.2 穿孔等离子弧焊技术

利用等离子弧能量密度和等离子流力大的特点,可在适当参数条件下实现熔化穿孔型焊接,称为穿孔型等离子弧焊,也叫做小孔型或者穿透型等离子弧焊接,它的原理如图 1-7-14 所示。焊接时,采用转移型等离子弧把焊件完全熔透并在等离子流力作用下形成一个穿透焊件的小孔,并从焊件的背面喷出部分等离子弧(称为“尾焰”)。熔化金属被排挤在小孔周围,依靠表面张力的承托而不会流失。随着等离子弧焊接方向移动,小孔也就跟着等离子弧向前移动,而熔池中的液态金属在电弧吹力、表面张力作用下沿熔池壁向熔池尾部流动,并逐渐收口、凝固,形成完全熔透的正反面都有波纹的焊缝,这就是所谓的小孔效应。稳定的小孔焊接过程是不采用衬垫实现单面焊双面一次成形的好方法,因此特别受到重视。一般大电流(100~500A)等离子弧焊大都采用这种方法。焊接时一般不加填充金属,但如果对焊缝余高有要求的话,也可加入填充金属。

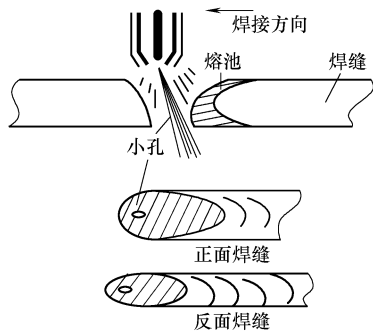


图 1-7-14 穿孔型等离子弧焊

应该指出的是,穿孔效应只有在足够的能量密度条件下才能形成。板厚增加时所需能量密度也增加。由于等离子弧的能量密度难以进一步提高,因此穿孔型等离子弧焊只能在有限板厚内进行。

穿孔等离子弧焊的焊接参数主要有喷嘴结构和孔径、离子气流量、焊接电流、焊接速度、喷嘴高度以及保护气流量等。喷嘴结构和孔径是选择其他参数匹配的前提,一般可按所需电流先确定喷嘴孔径。离子气流量增加可使等离子气流力和穿透能力增大,但过大时不能保证焊缝成形。跟其他电弧焊方法一样,焊接电流总是根据板厚或熔透要求首先选定的。在喷嘴结构确定的条件下,为形成稳定的穿孔焊接过程,电流有一个适宜范围,离子气流量也有一个使用范围,而且与电流将是相互制约的。对于给定厚度的焊接,为了获得小孔焊接过程,离子气流量、焊接电流和焊接速度这三个参数应保持适当的匹配。喷嘴高度一般取 3~5mm。保护气流量应与离子气流有一个恰当的比例,保护气流量太大会造成气流的紊乱,影响等离子弧的稳定性和保护效果。

为保证穿孔焊接过程的稳定性,装配间隙、错边等必须严加控制。添加填充焊丝可以略为降低对装配精度的要求。而采用熔透适应控制方法则是保证穿孔焊接过程稳定性的最可靠方法。板较厚时,为了保证起弧点充分穿透和防止出现气孔,最好采用焊接电流和离子气递增式起弧控制环节。

7.5.3 脉冲等离子弧焊技术

穿孔型、熔入型及微束等离子弧焊均可采用脉冲电流法,借以提高焊接过程的稳定性,此时称为脉冲等离子弧焊。脉冲等离子弧焊设备采用具备脉冲电流输出特性的电源,输出电流基值、峰值、占空比、脉冲频率等均可柔性调节,参数配置灵活,易于控制热输入和熔池,减少热影响区的宽度和焊接变形,适于全位置焊接,尤其是脉冲微束等离子弧焊,特点更突出,因而应用较广。脉冲频率一般为 15Hz 以下,脉冲电源的结构形式主要为晶闸管控制式或 MOSFET、IGBT 逆变式。

7.5.4 变极性等离子弧焊技术

变极性等离子弧焊(Variable Polarity Plasma Arc Welding, 简称 VPPAW)即不对称方波交流等离子弧焊,是为了解决铝金属等离子弧焊而提出的一种方法。它综合了变极性 TIG 焊和等离子弧焊的优点,具有能量集中、电弧挺度大、一次穿透深度大、焊后变形小等特点,被称为“零缺陷”焊接方法,具有广泛的应用前景。

20 世纪六七十年代,美国就开始进行变极性等离子弧焊接设备的研制工作,已成功应用于航天飞机外储箱等产品的焊接生产上。它使用特殊设计的弧焊电源和控制系统,电源输出极性可控变换。一般认为,变极性等离子弧焊负半波(电极接正即 DCEP)的主要作用是清除阻碍液态金属良好熔化、流动和熔合的氧化膜,而正半波(电极接负即 DCEN)的主要作用是加热工件,形成一定的电弧力集中作用于焊接区,实现焊件深而窄的熔化和穿透。由于电流幅值、正负半波导通时间比例以及频率等均可根据工艺要求灵活、独立调节,从而实现电弧热量的合理分配,在满足工件熔化和阴极清理作用的同时,最大限度地降低了钨极的烧损;同时,这种焊接方法又充分利用了等离子射流所具有的高能量密度、高射流速度和强电弧力的特性,在焊接过程中形成穿孔熔池,实现铝合金中厚板单面焊双面成形;此外,在焊接过程中存在电流极性的变换,会给熔池带来搅拌作用,有利于气体的逸出和杂质的排除,减少了气孔、夹渣等焊接缺陷,焊道窄,变形小。

与其他高能束流焊接工艺(电子束焊和激光焊)相比,VPPAW 焊接技术的设备简单,成本低。其中,变极性等离子弧焊电源是 VPPAW 焊接技术中的关键环节,必须具备正负半波的通电时间和电流幅值、频率等均可独立调节的能力。目前,主要的实现方法有以下几种:在对称电流幅值上叠加负半周电流法;晶闸管+电抗器式;晶闸管逆变式;双电源双通道式以及单电源双逆变式。目前,国内研究和应用较多的是单电源双逆变式,前级逆变一般采用全桥或者半桥拓扑,后级逆变普遍采用全桥或者双半桥结构。电源体积小,重量轻,效率高,动态性能以及控制性能好,是目前铝合金焊接最理想的电源之一。

7.5.5 激光-等离子弧复合焊技术

激光-电弧复合焊最初采用气体保护钨极电弧(GTA)为第二热源。随着研究的深入,Conventry 大学提出了激光-等离子弧复合焊(LB-PAW)技术。由于等离子弧的刚度大,指向性好,可以精确控制热源间距;钨极处于焊枪的喷嘴中,不受焊接中产生的金属蒸气的污染,复合电弧的稳定性好,钨极烧损小。用等离子弧代替 GTA,会获得更好的复合效果。

对 LB-PAW 技术开展的初步试验研究表明,与单独激光焊相比,此技术焊接速度快,间隙适应能力强,能有效克服气孔和热裂纹缺陷。与激光-MIG 电弧复合焊和激光-MAG 电弧复合焊相比,LB-PAW 更容易控制焊接的热输入,适合于薄板的高速连接。因此,LB-PAW 是一种具有较好工业应用前景的新技术。

参 考 文 献

- [1] 姜焕中. 电弧焊及电渣焊 [M]. 北京:机械工业出版社,1993.
- [2] 李德元,赵文珍,董晓强,等. 等离子技术在材料加工中的应用 [M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [3] 黄石生. 弧焊电源及其数字化控制 [M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [4] 过增元,赵文华. 电弧和等离子体 [M]. 北京:科学出版社,1986.
- [5] 陈克选,李鹤岐,李春旭. 变极性等离子弧焊研究进展 [J]. 焊接学报,2004 (2): 124-128.
- [6] 黄石生,王振民,薛家祥,等. 等离子弧喷涂系统的发展与展望 [J]. 电焊机,2000 (8): 3-6.
- [7] 张忠礼. 钢结构热喷涂防腐技术 [M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [8] 李志宁,都东,常保华,等. 激光-等离子弧复合焊技术的研究进展 [J]. 焊接,2007 (9): 19-23.
- [9] 西口公之,邵亦陈,朱轶峰. 等离子弧焊接与切割 [J]. 航空制造技术,1997 (5): 26-29.
- [10] 雷玉成,郑惠锦. 工艺参数对焊接等离子弧的影响 [J]. 焊接学报,2001 (12): 73-76.
- [11] 李亚江. 实用焊接技术丛书-切割技术及应用 [M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [12] Lancaster J F. The Physics of Welding [M]. Oxford: Pergamon Press, 1986.
- [13] 美国焊接学会. 热喷涂原理与应用技术 [M]. 麻菽璜,贾永昌,译. 成都:四川科学技术出版社,1987.

-
- [14] 中国机械工程学会焊接学会. 焊选手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [15] 吕耀辉, 陈树君, 殷树言. 铝合金变极性等离子弧焊接电源的研制 [J]. 航天制造技术, 2003 (1): 3-5.
- [16] 美国金属学会. 金属手册 (第六卷) [M]. 9 版. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [17] 张树生, 董晓强, 洪秋华. 等离子内孔堆焊枪的研制 [J]. 沈阳机电学院学报, 1983 (3): 65-73.
- [18] 董晓强, 高贺, 孙磊. 小孔等离子弧焊接能量分配及损失分析 [J]. 电焊机, 2008 (12): 77-79.
- [19] 贾传宝, 武传松, 张裕明. 受控脉冲穿孔等离子弧焊接控制系统 [J]. 机械工程学报, 2010 (06): 93-99.
- [20] 董文宁, 陈国余. 高效等离子焊接技术及其应用 [J]. 电焊机, 2007 (9): 9-16.
- [21] 白雪梅. 微机控制等离子弧焊系统研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2009.

第 8 章 其他电弧焊与切割基础

本章介绍水下焊接（Underwater Welding）与切割（Cutting）的基本原理和方法。着重阐述了湿法、高压干法以及局部干法水下焊接的施工方法、所用设备、质量检验及其安全防护知识，主要介绍了水下电-氧切割、等离子弧切割等水下切割的施工方法和设备及其安全技术，同时介绍了螺柱焊接、碳弧气刨的基本原理及其工艺方法和设备。

8.1 水下焊接

早在 1802 年，Humphrey Davy 就指出：电弧能在水下连续燃烧。1917 年，英国海军造船所采用水下电弧焊对船舶吃水线以下部位的铆接漏水部分进行焊接止漏。1932 年前苏联 Khrenov 发明了表面涂有防水层的水下药皮焊条，使水下焊接电弧的稳定性得到改善。但在其后的二三十年间，水下焊接仅在船舶紧急维修等有限场合获得应用。

随着人类对海洋资源的开发力度逐渐加强，海洋采油平台、输油气管线、海底矿产开发、海上机场等工程的建造与日俱增。目前，仅美国墨西哥湾就有超过 4000 座的海洋石油平台及超过 2092km 的输油管线。到 2009 年，我国海域已有 30 多个油井、100 多座采油平台，海底油气管线超过 2000km。近几十年来，水下焊接技术取得了很大的发展，已经成为海洋工程建造和维修的关键技术之一。随着海洋工程的建设向深水进军，水下焊接技术也面临着新的挑战。

大多数陆上的焊接方法都可应用于水下，但必须采取一定的措施，克服水和水深（压力）给焊接造成的困难。按隔水措施的不同可将水下焊接分为三大类：湿法焊接、干法焊接和局部干法焊接，如图 1-8-1 所示。湿法焊接直接在水中进行焊接，焊工和焊接区（包括电极、电弧和焊件）均在水中；干法焊接时焊工与焊接区完全与水隔开，在焊接舱内干的环境下焊接；局部干法焊接时焊工在水中，而焊接区与水隔开。

水下焊接环境比空气中焊接复杂得多，在水下实施焊接，必然受到水及水深压力的影响。

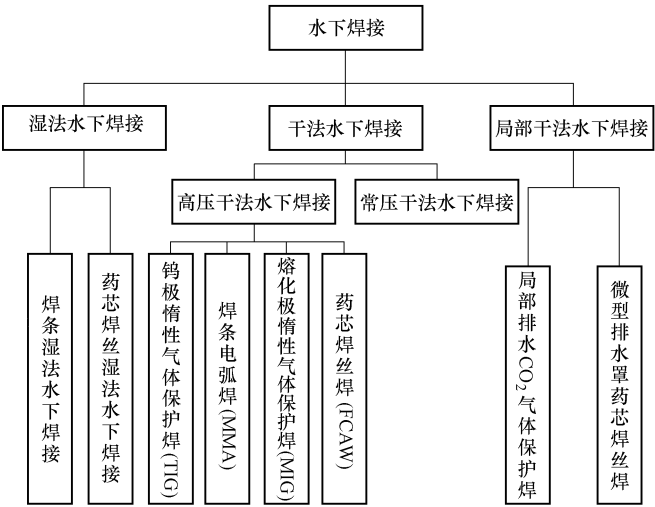


图 1-8-1 水下焊接分类

1. 水的影响

(1) 可见度 水对光的吸收、反射及折射作用比空气强得多, 光线在水中的传播能力仅为空气中的千分之一左右, 而且采用湿法或局部干法水下焊接时, 电弧周围不断产生气泡, 因此可见度很差, 潜水焊工很难清楚地观察到焊接熔池的状况。

(2) 焊缝冷却速度 湿法和局部干法焊接时, 虽然电弧周围有“气泡”或排水罩保护, 但其尺寸较小, 随着电弧的移动, 刚凝固的焊缝尚处于高温时即与水接触。水对焊缝的急冷效应显著, 容易产生淬硬组织, 甚至出现裂纹。

(3) 焊缝含氢量 湿法水下焊接时, 电弧高温将水分解成大量的氢和氧, 电弧气氛中氢的体积分数高达 62% ~ 82%, 使焊缝金属含氢量达 20 ~ 70mL/100g。高于在空气中焊接时的几倍。高压干法水下焊接时, 由于电弧气氛压力高, 氢在熔池中的溶解量大, 也导致焊缝含氢量高和产生气孔。只有常压干法水下焊接和空气中焊接的含氢量接近。

2. 水压力的影响

水深每增加 10m, 则水压力增加 0.1MPa。随着压力增加, 焊接电弧周围气流冷却作用明显增强, 使弧柱受到压缩, 电流密度显著增大, 电弧电压升高, 电弧稳定性降低。

另外, 水压增大导致熔池金属中气体溶解度增加, 焊缝中的氢气和氧气的含量增加, 因此深水焊接中气孔和非金属夹杂问题突出。水深增加, 焊缝金属中 C 含量也有增加的趋势, 而 Si、Mn 的含量则呈减少的趋势。

8.1.1 湿法水下焊接

湿法焊接最常采用的焊接方法是湿法焊条电弧焊 (MMA), 乌克兰巴顿焊接研究所开发了用于 20m 水深湿法水下焊接的自保护药芯焊丝。湿法焊接操作方便、灵活、设备简单、焊前准备时间短、施工成本低, 但接头质量不如干法, 目前湿法焊接仍然应用于海洋工程非重要结构的维修以及紧急处理场合。

1. 基本原理

图 1-8-2 为水下湿法焊接示意图。水与空气的物理特征的差异决定了湿法焊接过程的特殊性。湿法焊接当焊条或焊丝与焊件接触时, 电阻热将接触点附近的水汽化, 形成一个气相区, 电弧便可在气相区引燃。由焊条药皮分解物、母材与焊条反应物以及水分解组成的气体在电弧周围形成“气泡”, 将电弧和焊件上已形成的熔池与水隔开。由于电弧燃烧, 气泡体积增长到临界尺寸, 然后气泡破裂, 离开熔池向水面逸出, 但在这个过程中, 只是气泡的部分破裂上浮, 而留下一个直径 6 ~ 9mm 的核心气泡保护焊接电弧, 然后气泡又长大、破裂上浮, 周而复始直至焊接结束。气泡半径的变化范围在淡水中为 7 ~ 16.5mm, 海水中为 8 ~ 23mm。气泡气体包含体积分数为 62% ~ 82% 的 H_2 , 11% ~ 24% 的 CO , 4% ~ 6% 的 CO_2 、 O_2 、 N_2 和微量气态金属。

2. 电弧特性

电弧气泡是湿法水下焊接区别于空气中焊接的特殊现象之一。湿法水下焊接电弧发生的物理过程与空气中焊接电弧本质上是相似的, 均属气体放电。由于电弧受到水的冷却作用以及静水压力的影响, 水下电弧被压缩, 湿法焊条电弧焊的电弧静特性曲线呈凹形, 如图 1-8-3 所示。在焊接电流 130 ~ 200A 范围内, 电压 U_t 的最小值与电流相对应, 具体数值取决于电极直径和电弧长度。

如果将水下焊接电弧看做自由电弧, 在 0 ~ 100m 水深范围内, 水深每增加 10m, 电弧电压平均

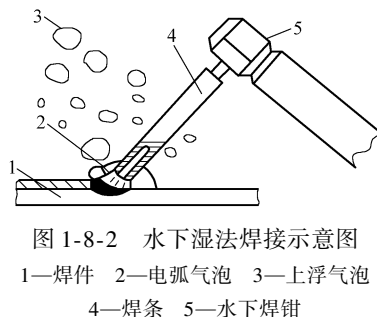


图 1-8-2 水下湿法焊接示意图

1—焊件 2—电弧气泡 3—上浮气泡
4—焊条 5—水下焊钳

增加 1.5 ~ 2V；在 100 ~ 300m 水深范围内，水深每增加 100m，电弧电压平均增加 4.5 ~ 5V。电弧持续时间、短路电流频率和熄弧频率随着水深增加而明显增加，焊接过程稳定性恶化。把稀有金属加入药芯焊丝，能够明显提高电弧的稳定性，短路和熄弧时间大约减少一半。随着盐度的增加，焊接过程的稳定性增加，引弧时间缩短。

一般水下焊接的电源安装在船上，对于深水焊接，由于焊接电缆长，外部电阻大，电缆上的压降较大，从而导致电弧电压的明显下降，进而导致电弧稳定性下降。如图 1-8-4 所示，随着水深增加，实心焊丝湿法水下焊接时电源的电压-电弧刚性显著降低，其结果是电弧长度变化持续时间随着水深增加而显著增加，电弧调节能力降低。

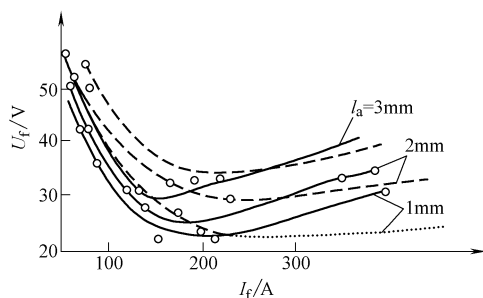


图 1-8-3 水下湿法焊条电弧焊接电弧静特性曲线（直流反接，淡水环境）
——4mm 直径电极 - - - - - 6mm 直径电极

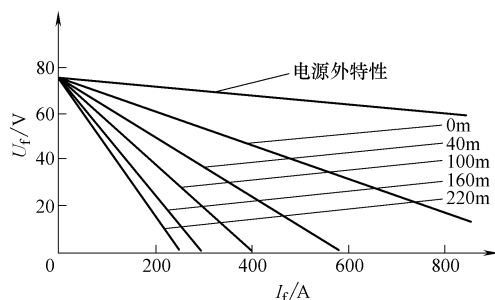


图 1-8-4 细实心焊丝湿法水下焊接时弧焊电源外特性刚度与水深的关系

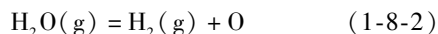
3. 焊接冶金

(1) 氧化还原反应 湿法水下焊接的最大问题之一是熔池金属氢含量高达 55 ~ 60mL/100g，达到了饱和状态。H 和 O 的来源主要是水的分解，其次是药皮或药芯中碳酸盐的分解。湿法焊接时发生一氧化碳分解反应：



在 300m 水深，O 和 C 含量比空气中焊接增加超过 2 倍，过高的 O 含量将降低焊缝韧性。如图 1-8-5 所示，随着水深或压力的增加，焊缝金属 Mn 和 Si 含量显著地下降。

在 50m 以内的浅水中，焊缝金属 C 含量随水深增加而快速增加。水下焊接时 C 的氧化反应控制了焊缝中的 O 含量，而 O 含量又控制了焊缝中 Mn 和 Si 的含量。在 50 ~ 100m 水深，焊缝金属 O 和 C 含量几乎不变，Mn 和 Si 含量也基本不变。超过 50m 后，水的分解反应成为湿法焊接的控制反应：



只要焊接电弧中 H_2 和 H_2O 的质量分数不随压力或水深变化，焊缝金属中 O 的含量将保持不变。焊缝金属中 O 和 Si 含量增加，将提高焊缝金属夹杂物数量，改善铁素体形核条件。增加 Mn 和 C 含量，将增加焊缝金属的硬化能力。

湿法焊接由于水的冷却作用，焊缝冷却速度比空气中焊接显著增加， $t_{8/5}$ 仅为 3 ~ 7s。在接近水面的深度，焊缝组织主要是初生铁素体 + 体积分数为 10% ~ 20% 的上贝氏体。随着水深增加，初生铁素体的体积分数降低至 50% 左右，上贝氏体和侧板条铁素体的含量增加。

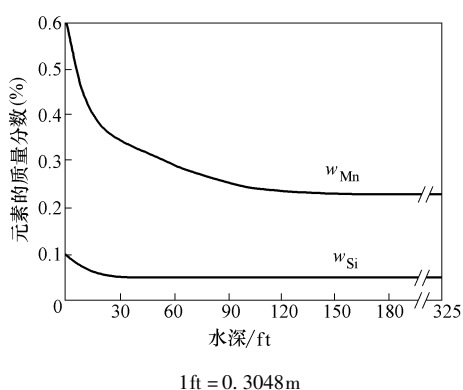


图 1-8-5 湿法焊接焊缝 Mn 和 Si 含量与水深的关系
1ft = 0.3048m

(2) 焊缝气孔 气孔是湿法焊接最常见的焊接缺陷,美国焊接协会的水下焊接规范(AWS D3.6)规定B级接头的气孔率不能超过5%。条湿法焊条电弧焊接时,当水深超过5m时,焊缝开始出现气孔。气孔率随水深增加而显著增加,水深由20m增加到60m,气孔率也相应地由2%升高到8%左右。湿法焊接的焊缝气孔主要是氢气孔,且以内气孔为主。随水深增加,气孔率增加,气孔尺寸变大。

降低接头氢含量可以减少气孔率。将药皮中碳酸钙的质量分数由9%增加至12.5%,10m水深湿法焊接焊缝气孔率相应地由2.2%降低到1.0%。提高水下焊条的药皮抗吸潮能力、采用焊条接负极以及采用大电流且短弧快速焊接也可降低熔池对氢的获取,进而降低焊缝气孔率。

4. 焊接设备

对于水下湿法焊条电弧焊,其设备主要由弧焊电源、焊接电缆、切断开关和 underwater 焊钳组成。水下焊接时,弧焊电源和切断开关放在工作船(或海洋平台)上,潜水焊工携带焊钳和焊条至施焊地点。对于水下湿法药芯焊丝焊接,其设备主要由弧焊电源、焊接电缆、潜水箱及焊枪组成。巴顿焊接研究所研发的半自动水下药芯焊丝焊接设备如图1-8-6所示。

(1) 弧焊电源 目前国内外尚无专用的水下湿法弧焊电源,通常使用陆上的普通弧焊电源。由于水下焊接时电缆很长,上面消耗的电压较大,因此提高弧焊电源空载电压有利于提高水下焊接电弧的稳定性。

(2) 水下焊钳 由于水特别是海水有一定的导电性,因此要求水下焊钳的绝缘性更高,而且由于水下可见度差,要求焊钳夹持焊条更方便、更可靠。图1-8-7所示为常用的圆棒形水下焊钳。

(3) 水下送丝机 进行水下药芯焊丝焊接时,如果施工点的水深超出了送丝机的送丝范围,就必须采用水下送丝机。为了防水,需要将送丝机放置在潜水箱内。潜水箱必须能承受外部静水压力,箱体内部充满绝缘介质,安装了送丝装置、张紧机构和丝盘转轴。

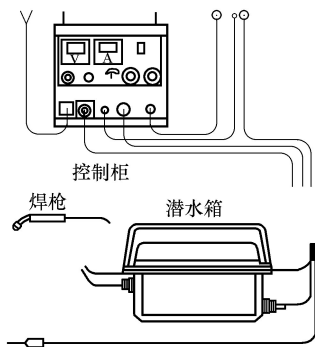


图 1-8-6 半自动水下药芯焊丝焊接示意图

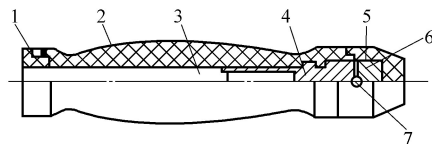


图 1-8-7 圆棒形水下焊钳示意图

- 1—尾部绝缘外壳 2—本体绝缘外壳 3—导线孔
4—铜质本体焊条夹块 5—夹头部绝缘外壳
6—铜质头部夹头 7—焊条插孔

5. 焊接材料

(1) 水下湿法焊条 为了满足水下湿法焊接电弧稳定性和降低焊缝扩散氢含量的要求,水下湿法焊条的药皮成分经过特殊设计,表面涂有防水层或采用酚醛树脂作粘结剂。我国目前常用的水下湿法焊条主要有上海东亚焊条厂生产的T202和华南理工大学开发的T203(桂林焊条厂生产)。目前水下湿法焊接最常用的焊条是金红石酸性湿法焊条,其焊接电弧稳定,焊缝成形也较好。而采用氧化铁型湿法焊条获得的焊接接头扩散氢含量低,氢致裂纹少。采用镍基湿法焊条获得的焊接接头氢致裂纹也很少。

(2) 水下湿法药芯焊丝 巴顿焊接研究所开发的水下湿法焊接金红石型自保护药芯焊丝 PPS-AN1, 其药芯中加入了镍, 使得水下焊缝金属中能形成针状铁素体, 同时能细化晶粒, 镍的质量分数如超过 2.5%, 将形成板条马氏体。焊丝直径 1.6mm, 水下焊缝抗拉强度达到 450MPa。

6. 焊接工艺

(1) 焊接参数 水下湿法焊条电弧焊一般采用直流正接法(焊件接弧焊电源正极, 焊条接弧焊电源负极), 焊接电流要比在空气中焊接高 20% ~ 30%。而药芯焊丝焊接采用直流反接, 焊接电流范围为 160 ~ 400A。水压对焊接参数的影响如图 1-8-8 所示, 图中 0.1MPa 水压(相当于 1atm)对应于 10m 水深。无论是对于恒流还是恒压焊接过程, 可以保证焊接过程稳定的焊接参数范围都随着水深增加而显著变窄。当水深增加时, 水下焊接电弧需要更高的电场强度才能将弧柱区的气体电离, 必须采用较高的空载电压(110V)。同时, 海水本身的盐分使得焊接环境中离子增多, 焊接时容易产生电离, 使得电流损失, 因此, 海水中焊接要比空气中焊接的电压提高 10% ~ 15%。另外, 采用脉冲电流可以使电弧更加稳定, 但扩散氢含量也增高。

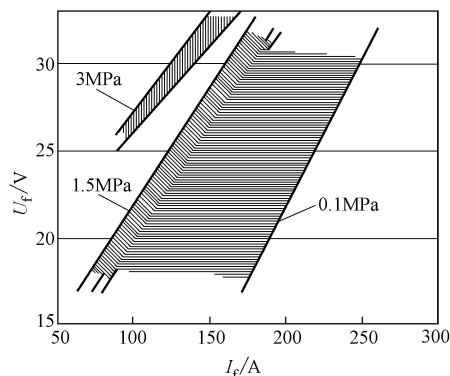


图 1-8-8 水压对水下焊接参数范围的影响

(2) 焊接操作 水下焊条电弧焊常采用“倚焊”。施焊开始, 将焊条接触于焊件的待焊处, 然后通知水面辅助人员“给电”, 接通焊接回路。潜水焊工摇动焊条或稍微提起焊条即可引弧。电弧引燃后, 焊条倚靠在焊件上, 与焊件成 60°左右的角度即可以进行连续焊接。收弧时, 一般采用划圈收弧法。

7. 其他湿法水下焊接

(1) 爆炸焊接 爆炸焊是利用炸药产生的冲击力造成被焊件的迅速碰撞, 进行金属材料连接的方法。当置于覆板上的炸药被引爆后, 强烈的爆炸波推动覆板与基板高速碰撞, 使撞击面金属发生塑性变形实现固相结合。在水下进行爆炸焊时, 水可以吸收一部分噪声, 并降低了危险性。

(2) 摩擦焊 它是在压力作用下, 利用被焊工件接触面的相互摩擦产生的摩擦热, 使被焊接面金属达到热塑化状态, 通过金属间的扩散和再结晶实现连接的一种焊接方法。日本大学对 6061 铝合金管进行了水下摩擦焊接, 水下摩擦焊产生的最高温度低于陆上摩擦焊, 软化区宽度也有所降低, 而且接头的延展性低于陆上摩擦焊。

8.1.2 高压干法水下焊接

干法水下焊接是通过建造一个容器作为焊接舱安装在工作现场, 然后将其中的水完全排开后进行焊接, 又可分为高压干法和常压干法。干法焊接排除了水对焊接过程的影响, 因此焊接质量好。但干法焊接也存在以下局限:

- 1) 水下焊接舱结构复杂, 需根据被焊结构定制, 制造成本昂贵, 施工时水下安装困难, 水面支持队伍庞大, 施工周期长, 成本很高。
- 2) 水下焊接舱往往受到工程结构的形状、尺寸和位置的限制, 有一定局限性, 主要用于管线等简单结构的焊接。

常压干法的焊接舱是密闭的, 如图 1-8-9a 所示。排开水后舱内压力为一个标准大气压, 舱外为水深压力, 舱内外的压力差依靠舱壁材料和结构来承受, 因此对焊接舱的设计和建造要求很高。虽然常压干法的焊接环境与空气中焊接一样, 可以直接采用空气中焊接的材料和工艺, 焊接质量也最好。但由于焊接舱在结构上的密封性和舱内压力的稳定性很难保证, 在实际施工中很少采用常压

干法焊接系统。

高压干法焊接是将水下高压焊接舱安装在待焊部位，高压舱的底部是敞开或密闭的，如图 1-8-9b 所示。通入压力高于水压的高压气体将舱内的水排开，焊接时焊工和焊接区均处于干的高压环境中。焊接舱通常采用钢结构建造，其结构形状和大小需与待焊部位的结构特征与尺寸匹配。舱的浮力平衡依靠压舱物或将焊接舱机械地固定在待焊结构上。

目前，高压干法焊接技术是国内外海洋工程主要结构和管道修复中使用最广泛的技术，本节主要介绍高压干法水下焊接。

1. 舱内气体

空气成本低而且随时随地可以得到，只需将其压缩至适当的压力就可以使用。

但是空气的氧含量高达 20%（体积分数），当舱内压力超过几个大气压时，舱内物体的可燃性会显著增加。此外，焊接时需要保护焊接熔池避免与空气中的氧和氮接触，而在高压环境下这是很难保证的。因此，在浅水区域，空气可作为压缩排水气体，但在深水区域则不适合。

氩气供应方便，热导率比氦气低，可以降低焊接金属冷却速度。但是，在高压环境下，氩气对潜水焊工有麻醉作用。所以，在有人操作的情况下不使用氩气，而对于无人操作的自动焊接环境，可采用氩气作为舱内气体。

氦气比氩气成本高得多。潜水员饱和潜水常用的潜水气体是氮氧混合气，因此可采用与此相似的混合气体作为有人操作的舱内气体。由于氮氧混合气体中氧含量低，不会增加可燃性，而且这种混合气体对潜水焊工无害。其主要问题是氦气的热导率高，将增加焊缝金属的冷却速度。

2. 焊接电弧

高压干法水下焊接时，随着水深增加焊接环境压力相应增加，对电弧的冷却作用也随之增大，所以高压焊接电弧的稳定性、电弧形态及电弧特性等与陆上常压焊接电弧不同。

(1) 电弧稳定性 随着环境压力增加，高压 TIG 焊的电弧稳定性降低，其具体表现是电弧围绕钨极根部随机波动。对于熔化极气体保护焊，随着压力增加，断弧时间百分数增大，电弧稳定性逐渐变差。

焊接电源外特性也对电弧稳定性有重要影响。高压焊接时，希望采用恒流或接近恒流特性的焊接电源，同时具有电压反馈控制弧长。恒压焊接电源不适合实心或药芯焊丝高压干法焊接。在较高的压力下，任何电压波动，都会引起电流的剧烈变化，进而破坏电弧稳定性。

(2) 电弧形态 如图 1-8-10 所示，采用氩气保护的常压熔化极气体保护焊，电弧阴极根部分布在宽广的氧化层表面上。而随着压力增加，焊接电弧的弧柱缩小而弧光强烈地增加，焊丝上的弧根也集中到焊丝顶端处，使焊丝端部成为钝角，同时可以看到阴极斑点在工件上剧烈地晃动。

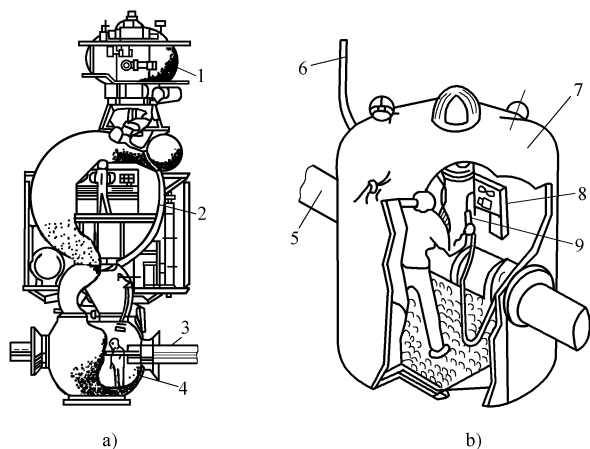


图 1-8-9 干法水下焊接示意图

a) 常压干法水下焊接示意图 b) 高压干法水下焊接示意图
1—人员进出室 2—设备及人员供应室 3—待焊管道 4—焊接室
5—工件 6—电缆 7—干室 8—焊接设备 9—焊枪

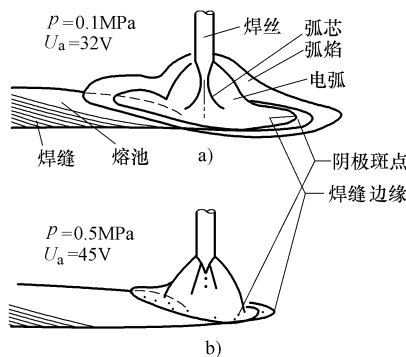


图 1-8-10 不同压力下氩气中的焊接电弧形态

在高压气氛中，弧柱的电位梯度升高，阴极斑点总是较窄地分布在焊件表面上，以维持最小的电弧电压。

(3) 电弧特性 环境压力对钨极惰性气体保护焊 (GTAW) 的焊接电弧特性的影响如图1-8-11所示。在0.1MPa的压力下， I_f-U_f 曲线为下降曲线。但当压力超过2.1MPa时，在Ar环境气氛中的 I_f-U_f 曲线为上升特性，在He环境中，小电流时是下降特性，大电流时是上升特性。电弧电压 U_f 是随弧长和环境压力的增加而增加的。理论上，电场强度与绝对压力的平方根成正比，见式(1-8-3)。

$$U_f = 9 + El\sqrt{p} \quad (1-8-3)$$

式中 U_f ——电弧电压，单位为V；

E ——常压下的电场强度，单位为V/mm；

p ——绝对压力，单位为bar，1bar=0.1MPa；

l ——弧长，单位为mm。

熔化极气体保护焊也存在同样的规律。随着焊接环境压力的增加，电弧电压升高。工作电压增加的根本原因是高压环境吸热能力的增加，即额外的能量需求导致电弧电压增加。电弧外部区域更容易损失热量，可以通过减少电弧直径来降低热量损失，此时，工作电流电弧交叉区域减少，电流密度、电离水平和工作温度增加。

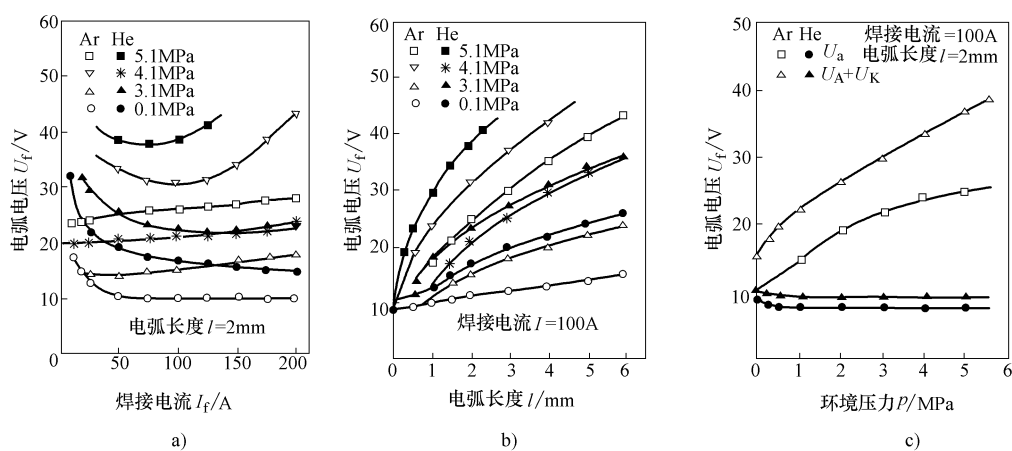


图 1-8-11 钨极惰性气体保护焊时环境压力对电弧特性的影响

a) 不同压力下焊接电流与电弧电压的关系 b) 不同压力下电弧长度与电弧电压的关系

c) 环境压力与电弧电压的关系

(4) 电弧温度 水下干法焊条电弧焊时，随着焊接水深增加，电弧温度升高。这是因为随着环境压力增大，电弧收缩程度增加，在焊接电流和弧长一定的条件下，电弧热功率有所增加。但随着焊接水深的进一步增大，电弧温度的上升趋势变缓。

3. 焊接方法

高压干法水下焊接采用的焊接方法主要有焊条电弧焊 (MMAW)、钨极惰性气体保护焊 (TIG) 及熔化极气体保护焊 (MIG) 等。

(1) 焊条电弧焊 高压焊条电弧焊工艺和设备简单，是最为广泛使用的焊接方法。该方法的主要缺点是易产生氢致冷裂纹，要严格控制焊接参数，正确存放、处理和使用焊条。一般情况下，水深超过200m时，电弧电压需要从约20V上升到25~27V。在水深超过60m时，对于直流正接法，焊条燃烧效率可以提高50%左右。图1-8-12所示为压力对焊条和母材熔化金属体积的影响。

空气中焊接时,熔敷金属体积与母材熔化体积的比值约为2:1,而在20~30m水深时,该比值就显著地升高至5:1或6:1。这说明高压下焊条的熔敷金属体积比母材熔化的体积多得多,焊接时不容易控制熔池,为此,通常的做法是减小焊接电流和焊条直径。

(2) 钨极惰性气体保护焊 由于TIG焊简单易行,电弧可以在没有金属熔敷的情况下长时间燃烧,在管道打底焊、填充焊、盖面焊以及回火处理焊道等场合得到了较广泛的应用。在密闭高压环境下,高频放电的引弧方式不能满足安全的要求,更多地采用电极击打工件碳衬的方式引弧。压力对TIG焊效率影响较大,0.1MPa时TIG焊效率约为90%,而压力为0.6MPa时下降为70%,压力为0.8MPa时又提高到75%,压力继续增大,焊接效率基本保持恒定,如图1-8-13所示。

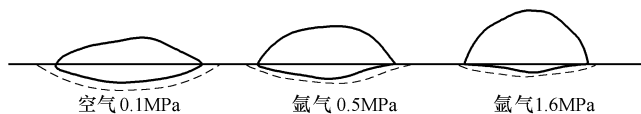


图 1-8-12 压力对 MMA 焊熔敷金属的影响

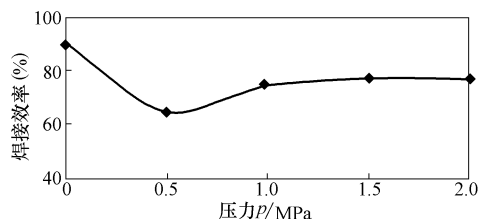


图 1-8-13 压力对 TIG 焊接效率的影响

(3) 熔化极气体保护焊 高压干法水下焊接时,采用实心焊丝无法进行全位置焊接。由于海洋工程结构通常采用较厚的钢板,而且浸在水中,焊接时热量损失很大,经常出现焊缝未熔合缺陷,高压下很少使用实心焊丝气体保护焊。

针对实心焊丝的局限性,人们发展了药芯焊丝。高压下焊接用的药芯焊丝中可以添加稳弧剂,也可以添加能够形成熔渣的材料以稳定熔池,还可以添加放热的化合物以向焊接熔池提供额外的能量。Oerlikon 公司开发了一种细直径(1mm)的药芯焊丝,可以在400m水深处获得优质焊缝。

4. 焊接冶金

环境压力对高压干法水下焊接的化学冶金反应有强烈的影响。从热力学的角度看,压力增加,有利于气体溶入熔池,并抑制形成气体的反应。焊缝中的 O 和 C 均随焊接环境压力而增加,但 Mn 和 Si 的含量都有所下降, S 和 P 的含量基本保持不变,如图 1-8-14 和图 1-8-15 所示。在弧柱高温下电弧气氛中高浓度的 CO 和 CO₂ 分解出 C 和 O 并溶入焊接熔池。随着环境压力增加,按热力学关系,抑制了 C 和 O 的反应,使焊缝含 C 量增加。由于 C 氧化受到了抑制,结果导致 Si、Mn 的强烈烧损,使焊缝中 Si、Mn 含量降低。

干法水下焊接虽然排干了焊接区的水,但舱内气氛还是潮湿的,因此在压力增加的情况下,焊缝金属扩散氢含量也高于空气中焊接。压力对焊缝扩散氢含量的影响如图

1-8-16 所示,扩散氢含量用每 100g 焊缝金属中扩散氢的体积 (cm³) 表示。在 0.1MPa 压力焊接下,焊缝含氢量约 6cm³/100g,随着环境压力增加,焊缝中的含氢量增加。在 1.1MPa 压力下焊缝扩散氢含量约 18cm³/100g,在环境压力大于 1.1MPa 后扩散氢含量基本不变,甚至稍有减少,这与充 Ar 环境焊接气氛中氢的分压变化有关。

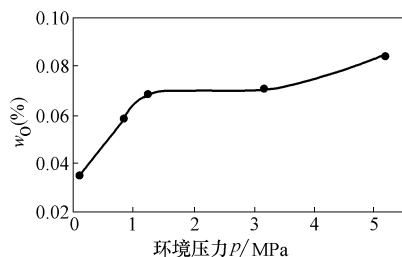


图 1-8-14 环境压力对焊缝金属氧的质量分数的影响

8.1.3 局部干法水下焊接

局部干法水下焊接是一种介于湿法和高压干法水下焊接之间的方法,它采用一种小型排水装置,通入高压气体或采用其他机械方式将焊接区周围的水排开,电弧在排水罩内“干”的环境下

燃烧，焊接过程类似于干法水下焊接，而焊工和其他设备仍然处在海水中，施工环境接近湿法水下焊接。局部干法水下焊接质量较高，而且设备简单，操作方便灵活，焊接前所需的准备工作较少，施工成本约为干法焊接的一半，可焊接的结构类型没有限制，因此是一种很有前途的水下焊接方法。

1. 水下局部排水半自动 CO₂ 焊

哈尔滨焊接研究所 1977 年研究成功了水下局部排水半自动 CO₂ 焊（简称 LD-CO₂）。

（1）基本原理 该法的原理如图 1-8-17 所示，利用一个特制的小型排水罩，其上端与潜水面罩（或头盔）相连接并密封防水，下端带有弹性泡沫塑料垫。半自动焊枪从侧面插入罩内，焊枪的手柄与罩体密封防水、铰接。焊接时将排水罩压在坡口上，向罩内通入 CO₂ 气体。由于排水罩上端被潜水面罩密封住，CO₂ 气体迫使罩内的水向下移动，从泡沫塑料垫与焊件的接触面处排出罩外，直至罩内全部充满 CO₂ 气体，形成一个 CO₂ 气室。这时引弧焊接，电弧便在 CO₂ 气体介质中燃烧，从而实现了局部干法水下焊接。焊接时，半自动焊枪和送丝箱都随潜水焊工带入水中，其余设备放在作业船（或工作平台）上，由水面辅助人员操作。

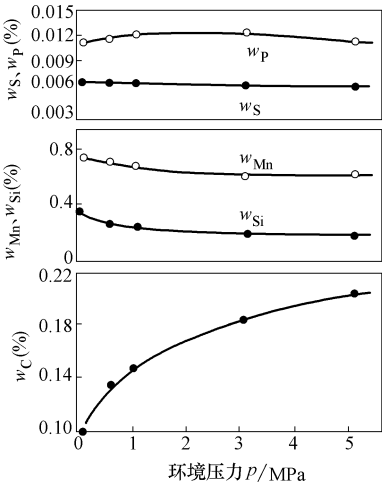


图 1-8-15 环境压力对焊缝化学成分（质量分数）的影响

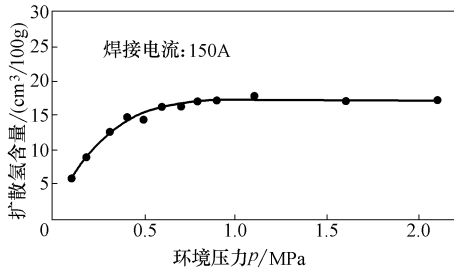


图 1-8-16 环境压力对焊缝金属扩散氢含量的影响

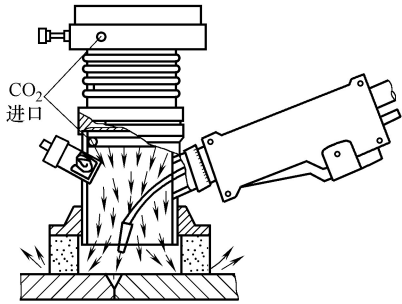


图 1-8-17 LD-CO₂ 焊接原理示意图

（2）焊接设备及材料 LD-CO₂ 焊使用 NBS-500 型水下局部排水自动焊机，该焊机由 ZDS-500 型晶闸管式弧焊整流器、SX-III 型电源型水下送丝箱、SQ-III 型水下半自动焊枪以及供气系统等部分组成。

LD-CO₂ 焊接法适用于焊接低碳钢以及抗拉强度为 500MPa 的低合金钢。一般采用直径为 0.8 ~ 1.2mm 的 H08Mn2SiA 镀铜焊丝。

（3）焊接参数 水下焊接都要求全位置焊接，一般选用 1mm 直径的焊丝，以短路过渡的参数进行焊接。焊接电流应根据钢板厚度、空间位置、坡口形式、所焊部位及需要的熔滴过渡形式来选择。常用的焊接电流及电弧电压范围见表 1-8-1。

表 1-8-1 不同直径焊丝 LD-CO₂ 焊接电流及电弧电压范围

焊丝直径/mm	焊接电流/A	熔滴过渡形式	电弧电压/V
1.0	90 ~ 180	短路	19 ~ 23
1.2	110 ~ 200	短路 + 颗粒	20 ~ 24

焊接速度范围为 $100 \sim 300 \text{ mm/min}$ ，焊丝伸出长度一般为焊丝直径的 10 倍， CO_2 气体流量需由潜水焊工根据实际观察到的排水效果确定。

2. 钢丝刷式局部干法水下焊接

日本 1979 年开发了一种钢丝刷式局部干法水下焊接装置，其工作示意图如图 1-8-18 所示。在普通 CO_2 焊接喷嘴端部镶上不锈钢丝刷，焊接时钢丝刷能围住喷嘴端部至工件间的电弧空间，钢丝刷有弹性，能保持与工件的良好接触。焊接时保护气体从钢丝间隙以小气泡的形式逸出，并排出里面的水，形成一个局部干的空间。由于电弧的强光被细密的钢丝挡住，只能从间隙透出很弱的弧光，因此可以直接观察焊缝。这种方法可用于对接焊和角接焊。

3. 微型排水罩药芯焊丝局部干法水下焊接

华南理工大学 1999 年研制成功微型排水罩药芯焊丝局部干法水下焊接方法，获得国家发明专利授权。

(1) 基本原理 微型排水罩药芯焊丝水下焊接时不需要外加压缩气体排水，它利用药芯焊丝焊接时药芯分解产生的气体以及残留在焊件表面的水汽化产生的水蒸气排水，在微型罩内形成一个动态无水区，电弧在其中稳定地燃烧。微型排水罩的结构和尺寸决定了水下焊接过程中无水区的大小和稳定程度，是影响焊接质量的关键因素。经过反复试验确定的微型排水罩直径仅为 25 mm ，其结构如图 1-8-19 所示。

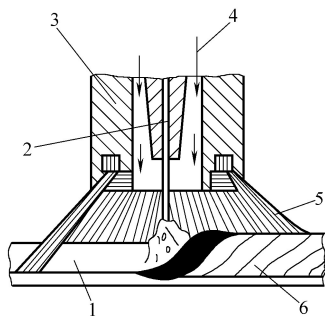


图 1-8-18 钢丝刷式局部干法水下焊接示意图

1—焊件 2—焊丝 3—喷嘴
4—保护气体 5—钢丝刷 6—焊缝

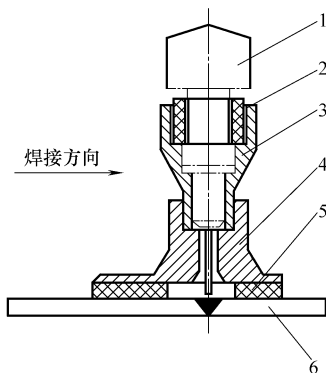


图 1-8-19 微型排水罩局部干法水下焊接示意图

1—焊枪 2—绝缘套 3—连接套
4—微型罩 5—密封垫 6—焊件

(2) 焊接设备及材料 微型排水罩药芯焊丝局部干法水下焊接可直接采用陆上气体保护电弧焊机。采用陆上 CO_2 气体保护药芯焊丝，还可以采用自保护药芯焊丝。

(3) 焊接参数 根据焊件板厚可选用直径 $1.2 \sim 2.4 \text{ mm}$ 的焊丝，相应电流为 $200 \sim 300 \text{ A}$ ，电弧电压为 $32 \sim 36 \text{ V}$ ，焊接速度为 $5.3 \sim 6.8 \text{ mm/s}$ 。

8.1.4 水下焊接标准与质量检验

1. 水下焊接标准

我国水下焊接的相关标准主要有《焊工考试规则》（中华人民共和国船舶检验局船规字 [1993]）、《水下局部排水二氧化碳保护半自动焊作业规程》（JT/T 371-1997）。

最完善的水下焊接标准是美国焊接学会（AWS）发布的 ANSI/AWS D3.6M—2010，该标准包括了湿法焊接和高压干法焊接，把焊接接头分成 A、B、C、O 四个等级，并对每个等级都提出了相应的质量与性能要求。至于具体的工程结构采用哪个级别的焊接接头，由用户决定。

2. 水下焊接检验

水下焊接施工的检查应按相应的标准或规范进行, AWS D3.6M—2010 对水下焊接接头的试验和检查进行了详细的规定。如用户有特殊要求, 可另行约定。水下检验的操作环境比陆上环境恶劣得多, 水下检测人员必须经过严格培训, 并持有相关证件。常用的水下无损检测方法有以下几种。

(1) 外观检查 检查时潜水员用肉眼或放大镜仔细观察, 也可借助水下摄像等方法, 将待检的部位摄录下来, 由陆上人员进行分析, 并提供书面证明文件。外观检查可检查尺寸较大的表面缺陷, 如咬边、夹渣、表面裂纹、表面腐蚀及表面机械损伤等。

(2) 磁粉检测 主要用于检查表面裂纹或近表面裂纹。在海洋工程结构中, 主要用于检查节点和焊缝的疲劳裂纹及其他服役裂纹。为了增强观测效果, 也常采用荧光磁粉。在浅水下, 也可采用彩色磁粉。对于海洋工程的钢管结构, 可采用线圈法磁化或饼式扁平线圈进行磁化。水下磁粉检测的可靠性较低。

(3) 超声检测 水下超声检测是目前最常用的方法之一, 主要用于水下焊缝内部缺陷的检测。水下与陆上超声检测原理基本相同, 有脉冲发射法和共振法等。通常, 需要水下和水面同步的两台超声波探伤仪, 其中水下部分是主控仪器, 要求有较高的水密性和耐水压性, 水下人员可以自由调节, 而水面部分则是辅助设备, 由水面人员进行监视, 但不能自由调节。

(4) 射线检测 对于干法焊接接头以及船体焊缝的质量检查, 可以采用水下射线检测。射线源一般放在气相空间之中, 胶片放在水中。由于海洋工程结构件的形状一般较复杂, 尺寸也较大, 用射线照相法往往难以得到满意的质量, 因此目前用得较少。

(5) 交流电场测量法 交流电场测量法 (ACFM) 在国外得到较快的发展, 目前已广泛应用于海洋工程、石油化工、电力工业和航空航天等领域, 尤其是海洋平台和水下结构物的检测 (如英国和挪威等)。ACFM 利用导电材料中的缺陷会改变电磁场的分布产生压电磁性效应, 通过测量电磁场分布的变化, 并和标准的理想缺陷所形成的电磁场进行比较, 从而确定缺陷。

8.1.5 水下焊接安全技术

1. 一般要求

水下焊接与切割是潜水和焊接与切割相结合的综合性作业, 技术要求高、工作环境恶劣、危险性大。潜水焊工直接在水中进行带电操作, 往往比在空气中焊接有更大的危险性。同时, 水下焊接产生的气泡里主要是 H_2 和 O_2 的混合物, 这些气体在狭窄空间累积时也可能引起爆炸。在高压舱内进行干法水下焊接时, 也有材料或气体燃烧和爆炸的危险。因此, 进行水下焊接与切割作业时, 必须切实遵守水下焊接和切割的安全规定, 确保施工安全。

在水下进行焊接与切割作业前, 应认真调查作业区的环境, 熟悉焊接或切割的工程结构状况和工作要求, 清楚作业区的障碍物和易燃易爆物品, 了解发生紧急情况时的应对措施和方案。下水前, 潜水作业人员要检查所有的设备、夹具、通信器材等, 确保其处于完好状态。要配备水面支援人员与潜水作业人员配合工作, 并规定统一的联络及应急用语和信号。

水下焊接与切割时, 要注意保护作业人员的眼睛。若潜水焊工着重潜装具进行操作时, 应佩戴适当的护目镜; 若着轻潜装具操作时, 可佩戴软性角膜接触镜。焊工严禁触摸处于高温的焊缝、焊条或割条, 并应注意潜水装具及气管不要处于高温物质喷落的区域。

2. 水下焊接的安全与防护

(1) 高压干法水下焊接 高压焊接舱内的氧分压对焊工安全非常重要。对于下端开口的高压焊接舱, 且焊工在紧急情况下能快速下潜的生产环境, 当水深小于 27m 时, 可使用空气作为舱内气体, 超过 27m 时, 应使用 $He + O_2$ 混合气体。对于封闭的焊接环境, 必须使用 $He + O_2$ 混合气体,

而且焊接舱内要装备高压喷水系统,潜水服及手套必须用阻燃材料做成。呼吸系统和通信线路必须有耐热层进行保护。为了防火,还必须在焊接舱内装备只读的氧分析仪,随时对舱内的含氧量进行监测。采用空气作为水下高压焊接舱内气体时,要不断换气,防止烟雾在舱内积聚。在使用混合气体时,在焊接舱内要安装气体烟雾清洁剂或除尘器。为了防止焊工潜水面罩排出的气体污染舱内环境气体,必须采用排气系统,将其排放到舱外。水下焊接舱内不能放置涂料、熔剂等可能放出有毒或刺激性气体的物质。焊接舱内还要安装视频监控设备,以便水面人员监控焊接舱内活动。

(2) 湿法水下焊接 在水下焊接时,应使用直流电源,且必须使用水下焊接专用的焊钳,潜水焊工要戴好防水绝缘手套,且不与带电体直接接触。在带电结构上进行水下焊接时,应首先切断结构上的电流,然后进行水下焊接。水下作业时要接牢地线,潜水焊工应面向地线,焊枪(工作点)位于焊工及地线之间。更换焊条时,应通知水面人员切断电源。在焊接空间狭窄或可能造成气泡积聚的场合,必须采取措施排除气泡。

在进行核设施的水下焊接时,干潜水服要和靴子及手套做成一体,防止潜水员受到核辐射。在每次潜水作业前,干潜水服必须要用压缩空气做气密试验。

局部干法水下焊接的安全防护要求与湿法水下焊接的要求相同。

8.1.6 水下焊接应用实例

1. 牺牲阳极的装焊

海洋工程结构长期浸泡在海水中,很容易发生电化学腐蚀,导致结构的使用寿命大大缩短。为防止金属遭受电化学腐蚀,工程上通常在被保护结构上焊装牺牲阳极,使被保护结构成为阴极,从而减轻或消除金属的腐蚀。牺牲阳极的极块通常由 Al、Zn 等合金铸成,极脚一般为碳钢,与海水中的钢结构一般采用湿法水下焊接的方法连接。

牺牲阳极与水下钢结构的连接方式分为直接连接和挂钩连接,如图 1-8-20 所示。挂钩连接方式装焊比较方便,应用于南海某部新建的钢管桩码头中。连接板上的挂钩可先在陆上焊好,到水下再将连接板焊在钢管桩上,然后将重 80.6kg 的牺牲阳极两头的极脚放在两个钩上,再将钩与极脚焊牢。焊接水深 6~7m,采用 T203 水下焊条,焊条直径 4mm,焊接电流为 180~200A。焊接连接板与钢管桩的两条垂直焊缝用向下立焊可获得较好的焊缝成形。牺牲阳极焊完后,测钢管桩电位全部达到 -0.95V ,说明水下焊接的连接良好,牺牲阳极可起防腐蚀作用。

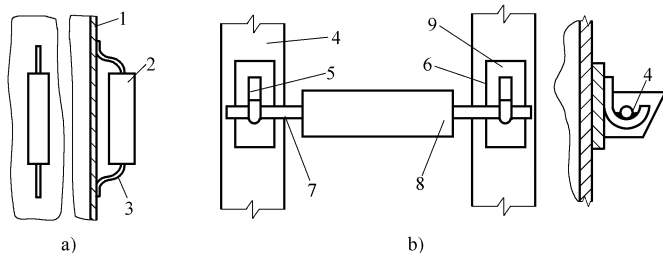


图 1-8-20 牺牲阳极与水下钢结构连接示意图

a) 直接连接 b) 挂钩连接

1、4—钢桩 2、8—牺牲阳极 9—连接板 5—挂钩 6—水下焊缝 3、7—极脚

2. 平台水下桩的焊接

水下桩是增加平台承载能力和稳定性的辅助桩。渤海 12 号钻井平台有 6 根水下桩,需焊缝是连接钢桩和导管的弧形板两端的两条环缝。为使潜水焊工在水下能稳定地操作,依照被焊结构特点制作水下工作台,其结构为由两个半圆筒组成的圆筒形工作台,这个工作台又起阻挡水流的作

用，故又称为挡流筒。图 1-8-21 所示为潜水焊工在挡流筒内进行水下焊接操作的示意图。

焊接施工是在水深 13.5m、水温 8~10℃、海面最大风力为 6 级、最大海水流速为 2m/s 的条件下进行的。采用局部排水 CO₂ 焊方法，焊丝直径为 1mm (H08Mn2SiA)，电弧电压为 29~30V，焊第一道焊缝时焊接电流为 100~120A，焊其余焊道时焊接电流为 130~180A，CO₂ 气体流量为 5~7m³/h。

焊后经外观检查及超声波检测，焊缝成形良好，没有外观及内部焊接缺陷，焊接接头的力学性能满足设计要求。

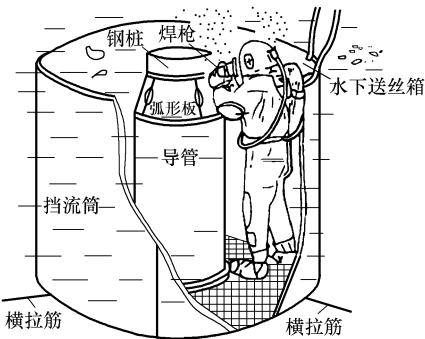


图 1-8-21 水下桩水下焊接操作示意图

8.2 水下切割

水下切割是海洋工程结构的报废解体和拆除、沉船打捞和船舶修理等必不可少的工艺。水下切割技术依据其基本原理和切割状态不同，可分为两大类，即水下热切割法和水下冷切割法，具体分类如图 1-8-22 所示。

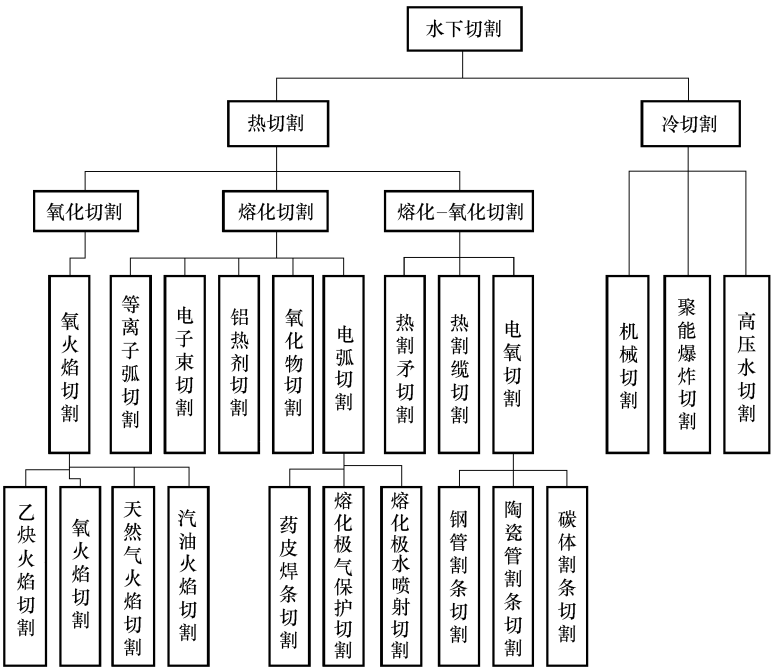


图 1-8-22 水下切割技术的分类

8.2.1 水下电弧-氧气切割

目前最常用的水下切割方法是电弧-氧气切割，其原理如图 1-8-23 所示。它是利用空心电极（即割条）与工件之间产生的电弧加热熔化工件，氧气通过空心电极吹向工件，使工件熔化金属发生强烈氧化放热反应进一步熔化工件，氧气射流还把氧化物及熔融金属吹掉形成切口。水下电弧-氧气切割适用于能导电的金属材料，但主要用来切割易氧化的低碳钢和低合金高强度钢，其使用水

深已超过 150m。但水下电弧-氧气切割由于切口质量不高，多用于水下破坏性切割，以切断材料为目的。

水下电弧-氧气切割设备包括切割电源、割炬、切割电缆、断电控制器（手动的和自动的）、氧气瓶、减压器、氧气胶管和切割条等。水下切割电源可以使用陆上的直流焊接电源，其额定工作电流应大于 500A，软电缆的导电截面积宜用 70mm^2 以上。割炬可采用我国生产的 SG-Ⅲ型水下电弧-氧气割炬，如图 1-8-24 所示。水下电弧-氧气切割一般采用直流正接法，即切割条接负极，被割工件接正极。目前常用的割条可分为钢管割条、发热割条、陶瓷管割条以及碳棒割条 4 类。

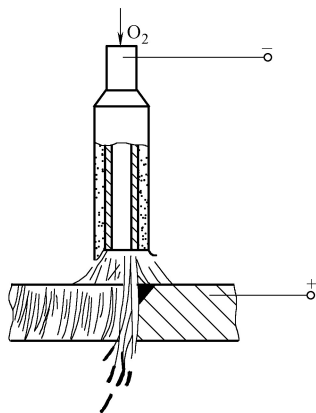


图 1-8-23 水下电弧-氧气切割示意图

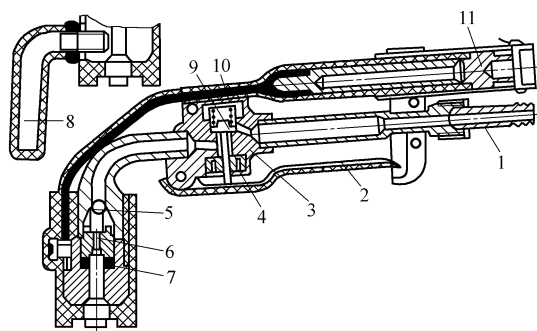


图 1-8-24 SG-Ⅲ型水下电弧-氧气割炬结构示意图

- 1—氧气胶管接头 2—开阀手柄 3—阀体 4—开启用阀杆
5—回火防止球 6—回火保险器座 7—密封垫 8—夹紧螺钉
9—氧气阀头 10—气阀回位弹簧 11—电缆接头

8.2.2 水下等离子弧切割

水下等离子弧切割是利用高温高速等离子气流加热熔化待切割材料，并借助高速气流或水流把熔化材料吹掉，直至等离子气流束穿透待切割材料形成切口。等离子弧温度高，通常可达 $18000 \sim 24000\text{K}$ ，因而不需依靠氧化放热反应，就能熔化被切割材料，能够切割绝大部分金属和非金属材料。其原理如图 1-8-25 所示。

切割时钨极接电源负极，工件接电源正极。由于等离子弧难以直接在钨极和工件之间形成，必须先在钨极和喷嘴之间引燃引导电弧，然后再转移过渡到钨极和工件之间。对于金属材料的切割，一般都采用转移弧。而对于非金属材料的切割，只能用非转移弧。

水下等离子弧割炬增设了屏蔽喷嘴，喷出的气体（或水）围绕等离子弧形成屏蔽，保护等离子弧不受外界水的干扰，同时对等离子弧也起到一定的压缩作用，使其能量进一步集中。

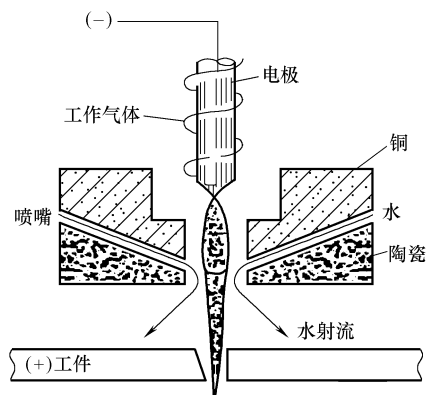


图 1-8-25 水下等离子弧切割原理示意图

8.2.3 其他水下切割技术

1. 水下氧可燃气切割

水下氧可燃气切割是利用气体火焰将被切割金属表面预热到一定温度后，喷出高速切割氧

流,使金属燃烧并放热,同时把燃烧生成的氧化物及熔化金属吹掉,完成切割过程。可以使用的可燃气体主要有乙炔、氢气、甲烷和汽油等。水下氧乙炔切割的水深不超过 8m,水下氧氢切割是最常使用的气割方法,可用于 8m 以上的水深。

2. 药芯焊丝水下切割

巴顿焊接研究所开发了水下药芯焊丝切割机,这种切割方法不需供氧。用于水下切割的药芯焊丝要求引弧稳定并能保持长弧。其药芯为造气性碳酸盐加上促进电离的元素,如 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 、 Na_2SiO_3 等。大量的造气造氧元素,除了产生大量液态金属氧化物和气泡,还形成等离子喷射,对液体金属产生动压力,加速燃烧穿透被切割金属。水下切割电弧开始时在焊丝端部和工件之间燃烧,属“焊丝端部-熔池”模式;当板厚较厚时焊丝端部进入切口内,此时电弧会在焊丝侧面和切口边缘间燃烧,属“焊丝侧面-切口边缘”模式;当焊丝变短后,电弧又重新回到“焊丝端部-熔池”模式;切割时电弧在这两种模式间周期性地循环变换,完成切割过程。

3. 水下激光切割

激光切割具有切口窄、切割速度快、热影响区小、材料变形小的优点,可以切割几乎所有材料并具有无限的仿形切割能力。在水下激光切割中,由于水对激光有一定的吸收作用,会使到达加工工件表面的激光能量减少,从而减弱加工效果。在水中穿透能力最佳的激光,其波长属于紫外光波长范围,因此水下激光切割采用 Nd:YAG 固体激光器较好。水深越深,水对激光的吸收作用越强,激光能量损失越大。水体流动可加强水的冷却效果和冲刷作用,改善激光切割的质量。

8.2.4 水下切割安全技术

水下切割的安全与防护主要有以下几点。

- 1) 在任何情况下都禁止利用油管、钢缆、船体、锚链或海水作为接地线,接地线必须使用具有足够导电截面积的软电缆,直接同被割结构连接,并且必须连接牢固。
- 2) 应设置作业平台或工作架,不允许潜水员在悬浮状态下进行工程切割。
- 3) 在水下进行密闭容器、储油及储气罐、油管等的切割时,应采取可靠的措施排除油气后方可作业。
- 4) 水下进行切割时,应从上而下分层切割,不得在自身或其他作业人员头顶上方进行切割。构件割断前应留有足够的避让位置,使自己处于最安全可靠的位置后,才进行最后割断工作,防止压伤自身和损伤佩戴的装备。
- 5) 禁止将割炬触及自身或其他作业人员身体的任何部位,特别不要触及金属头盔,防止意外事故。
- 6) 切割应从工件的边缘进行,任何情况下不可长时间熔割,防止氧气、氢气和水蒸气在深洞或凹坑聚积滞留,引起爆炸。

8.3 螺柱焊技术

在金属螺柱或类似的其他金属紧固件的端面与另一板状工件之间利用电弧热使之熔化并施加压力完成连接的焊接方法称为螺柱焊。它兼具熔焊和压焊特征,是一种加压熔焊。焊接过程中的加热和加压程序由设备自动控制,有半自动操作和自动操作两种方式。螺柱焊可以代替铆接或钻孔螺钉紧固等,广泛应用于汽车、造船、机车、航空、机械、锅炉、化工设备、变压器及大型建筑结构行业。

螺柱焊的接头是 T 形接头,螺柱或类似的紧固件的轴线垂直于工件的待焊表面。待焊表面主要是平的,也可是斜面或曲面的,可在平焊、立焊或仰焊位置焊接。

螺柱焊有电弧螺柱焊和电容放电螺柱焊两种基本方法。两者的主要区别是供电电源和燃弧时间长短不同，前者由弧焊电源供电，燃弧时间为0.1~1s；后者由电容储能电源供电，燃弧时间非常短为1~15ms。此外，电弧螺柱焊常使用焊剂（焊铝时使用保护气体）和陶质套圈，而电容放电螺柱焊因燃弧时间很短，不需焊剂和外加保护，焊接时不需要填充金属。

8.3.1 螺柱焊工艺过程与设备

1. 电弧螺柱焊工艺过程

电弧螺柱焊电弧的发生与焊条电弧焊时焊条的引弧原理是相同的，都是短路提升引弧。不同的是螺柱被夹持在焊枪的夹头上，操作者将螺柱放入焊枪的夹头里并套上套圈，使螺柱端与工件接触，如图1-8-26a所示。按下开关接通电源，焊枪中的电磁线圈通电使螺柱提升并随即引弧，电弧热使螺柱端和母材熔化，并由时间控制器控制燃弧时间，如图1-8-26b所示。在断弧的同时，线圈也断电，压紧弹簧加压使螺柱压入熔池，如图1-8-26c所示，冷却形成接头完成焊接。最后提起焊枪并移去套圈，如图1-8-26d所示。

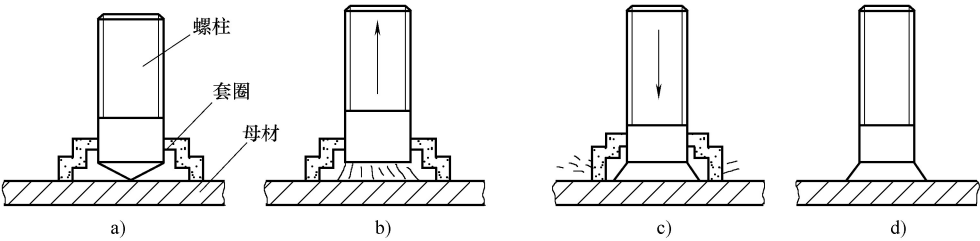


图 1-8-26 电弧螺柱焊接过程示意图

a) 套上套圈，短路定位 b) 螺柱提升，电弧引燃，熔池形成 c) 落钉 d) 接头形成，焊接结束

2. 电弧螺柱焊设备

电弧螺柱焊的全套设备如图1-8-27所示，由弧焊电源、控制系统、焊枪三大部分组成。

(1) 弧焊电源 电弧螺柱焊对弧焊电源的要求如下。

- 1) 为了得到稳定的电弧，需使用直流弧焊电源。
- 2) 具有较高的空载电压，为70~100V。
- 3) 具有陡降外特性。
- 4) 能在短时间内输出大电流并迅速达到设定值。

一般的焊条电弧焊电源配备一个控制箱，以进行电流的通断、引弧和燃弧时间的控制就可以使用。药皮焊条电弧焊焊接电流按焊条直径的30~50倍来选择，而电弧螺柱焊却要按螺柱直径的50~100倍来确定，所以螺柱焊电流要比普通焊条电弧焊电流大很多，一般均采用专用设备，只有在小直径螺柱焊时才使用焊条电弧焊的电源或两台并联使用。表1-8-2列出部分国产电弧螺柱焊机及其技术数据。

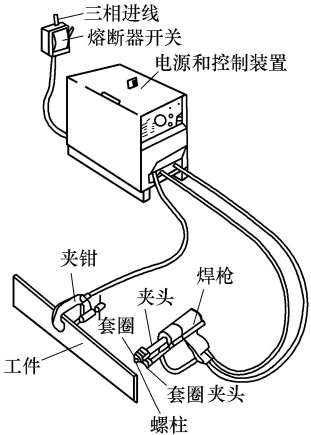


图 1-8-27 电弧螺柱焊设备

表 1-8-2 国产电弧螺柱焊机及其技术数据

型号	新	RSN-800	RSN-1600	RSN-2000	RZN-1000	RZN-2000	RZN-2500
	旧	ZL5-800	ZL5-2000	ZL5-2000(7%)	QZL-1000	QZL-2000	—
类别		晶闸管整流	晶闸管整流	晶闸管整流	—	—	—
电源		3相380V,50Hz	3相380V,50Hz	3相380V,50Hz	3相380V,50Hz	3相380V,50Hz	3相380V,50Hz

(续)

型号	新	RSN-800	RSN-1600	RSN-2000	RZN-1000	RZN-2000	RZN-2500
	旧	ZL5-800	ZL5-2000	ZL5-2000(7%)	QZL-1000	QZL-2000	—
输入容量/(kV·A)		70	140		10~160	25~210	10~230
空载电压/V		65	69	85			
负载持续率(%)		60	60	60	60	60	60
额定焊接电流/A		50~800	120~1600	400~2000	400~1000	250~2000	200~2500
焊接时间范围/s		—	—	0.2~1.5	0.2~1.2	0.2~1.2	0.2~1.5
螺柱直径/mm		3~12	3~19	6~22	6~12	4~22	4~25
重量/kg		250	360	500	200	350	800
尺寸 (长×宽×高)/mm		860×620×1130	860×620×1230	950×730×1124	—	—	—

(2) 控制系统 电弧螺柱焊与焊条电弧焊的不同之处是焊接时没有空载过程，短路预压、引弧焊接、螺柱下落及通电维持四个动作是由控制系统焊前设定并且由焊枪自动完成的。螺柱焊输出电压、电流及螺柱位移时序图，如图 1-8-28 所示。电弧螺柱焊的控制系统一般和弧焊电源装在一个箱体

内。(3) 焊枪 焊枪是螺柱焊设备的执行机构，电弧螺柱焊枪有手持式和固定式两种，其工作原理相同。手持式焊枪应用较为普遍与方便，图 1-8-29 所示为其中的一种结构，固定式是为特定产品专门设计的，被固定在支架上，在一定工位上完成螺柱焊接。

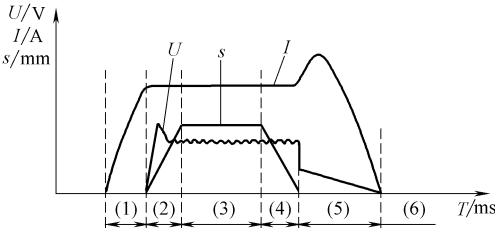


图 1-8-28 电弧螺柱焊焊接过程

电流、电压、螺柱位移时序图

- (1)—短路通电 (2)—提升 (3)—电弧正常燃烧
(4)—落钉 (5)—有电顶锻 (6)—焊接结束

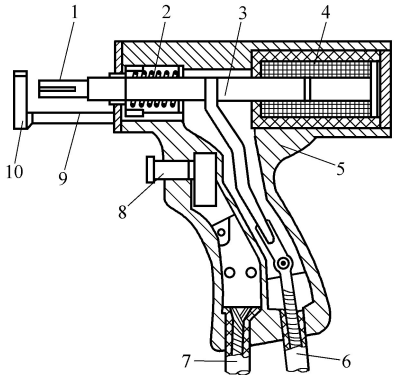


图 1-8-29 电弧螺柱焊枪结构

- 1—夹头 2—弹簧 3—铁心 4—电磁线圈
5—枪体 6—焊接电缆 7—控制电线
8—按钮 9—支架 10—脚盖

焊枪机械部分由夹持机构、电磁提升机构及弹簧加压机构三部分组成。如果采用氩气保护，还应有气体喷嘴及气路。电气部分由焊接开关、电磁铁及焊接电缆组成。焊枪上的可调参数有螺柱提升高度、螺柱外伸长度和螺柱与套圈夹头的同轴度等。

3. 电容放电螺柱焊工艺过程

以充于电容器中的电能瞬时放电产生的电弧热来连接螺柱与工件的方法称为电容放电螺柱焊。由于焊前电能已储存在电容器内，故又称电容储能螺柱焊。根据引燃电弧的方式不同，有预接触式、预留间隙式和拉弧式 3 种焊接方法。

(1) 预接触式电容放电螺柱焊 这种焊接方法过程示意图如图 1-8-30 所示。螺柱待焊端须设计有小凸台，焊接时先将螺柱对准工件，使小凸台与工件接触（见图 1-8-30a），然后施压使螺柱

推向工件。同时电容放电,大电流流经小凸台。因电流密度很大,凸台瞬间被熔化汽化而产生电弧(见图1-8-30b),在电弧燃烧过程中,工件待焊表面被加热熔化,这时由于压力一直存在,故螺柱向工件移动(见图1-8-30c),待柱端与工件接触,电弧熄灭,即形成焊缝(见图1-8-30d)。整个焊接过程的特点是先接触后通电,加压在通电之前。

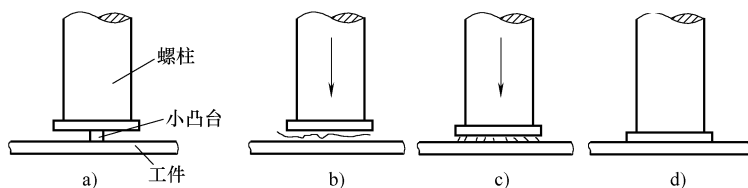


图1-8-30 预接触式电容放电螺柱焊接过程示意图

(2) 预留间隙式电容放电螺柱焊 这种焊接方法螺柱的待焊端也须设计有小凸台,焊接时螺柱对准工件,但不接触,两者之间留有间隙(见图1-8-31a)。然后通电,在间隙间加入了电容器充电电压(空载电压),同时螺柱脱扣,在弹簧、重力或气缸推力作用下移向工件。当螺柱与工件接触瞬间,电容器立即放电(见图1-8-31b),大电流使小凸台熔化而引燃电弧,电弧使两待焊面熔化(见图1-8-31c),最后螺柱插入工件,电弧熄灭而完成焊接(见图1-8-31d)。此螺柱焊接过程的特点是留间隙,先通电后接触放电加压,完成焊接。

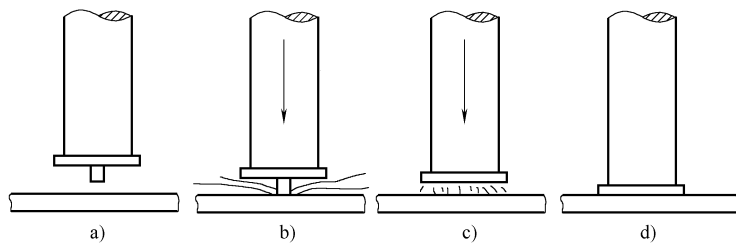


图1-8-31 预留间隙式电容放电螺柱焊过程示意图

(3) 拉弧式电容放电螺柱焊 这种焊接方法螺柱待焊端不需设计小凸台,但需加工成锥形或略呈球面。引弧的方法与电弧螺柱焊相同,需由电子控制器按程序操作,其焊枪与电弧螺柱焊枪相似。本系统中给电弧供电的电源,由电流较小的起辅助作用的普通整流电源和由电容器组提供的电容储能主电源两个支路并联而成。焊接时,先将螺柱在工件上定位并使之接触(见图1-8-32a),按动焊枪开关,接通焊接回路和焊枪体内的电磁线圈;线圈起作用就把螺柱拉离工件,辅助电源提供的小电流使它们之间引燃小电流电弧(见图1-8-32b)。当提升线圈断电时,电容器组通过电弧放电,大电流将螺柱和工件待焊面熔化,螺柱在弹簧或气缸力作用下返回向工件移动(见图1-8-32c),当插入工件时电弧熄灭,完成焊接(见图1-8-32d)。此法的特征是接触后拉起引弧,再电容放电完成焊接。

4. 电容放电螺柱焊设备

电容放电螺柱焊的设备主要是由电源、控制器和焊枪三者组成。电源和控制器常装成一体,有手提式和固定式两种。如图1-8-33所示为手提式电容放电螺柱焊设备示意图。

(1) 电源 电容放电螺柱焊机的电源主要由储能的电容器组和为电容器充电的装置组成,通常是根据最大储存能量(J)进行专门设计,充电装置以小功率取自网路能量储藏于储能电容器组中。电容器的电容量在20000~200000 μ F的范围,电容器组的充电电压不超过200V。为加快充电速度,输入电源电压为单相或三相的220V或380V。国产电容(储能)放电螺柱焊机及其技术参数见表1-8-3。

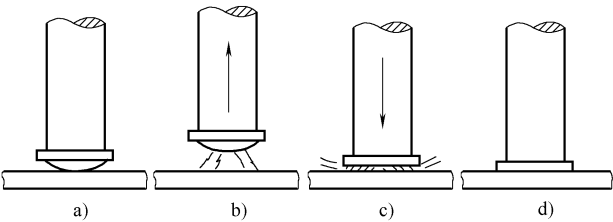


图 1-8-32 拉弧式电容放电螺柱焊

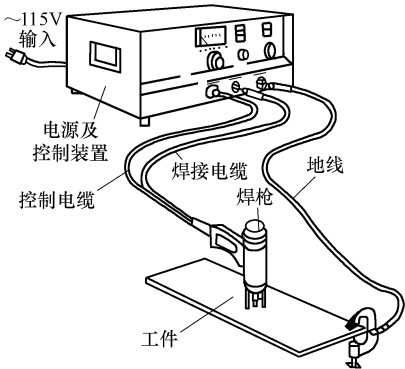


图 1-8-33 手提式电容放电螺柱焊设备示意图

表 1-8-3 国产电容（储能）放电螺柱焊机及其技术数据

型号	新 旧	RSR-800	RSR-1600	RSR-2500	RSR-1000	RSR-4000	RSR-6000
		—	—	—	DLR4-1000	JLR-4000	DLR4-6000
类别		接触式	接触式	接触式	间隙式	接触式	接触式
电源/V		220/110	220/380	220/380	220V, 50Hz	单相 380V, 50Hz	单相 220V, 50Hz
电源容量/(kV·A)		<1.5	<2.5	<3	<0.8		3
额定储能/J		800	1600	2000	1000	4500	6000
电容器电压调节范围/V		40 ~ 160	40 ~ 160	40 ~ 160	充电电压 35 ~ 190V	最高充电电压 200V	充电电压 30 ~ 180V
螺柱直径 /mm	碳钢、不锈钢	3 ~ 6	4 ~ 10	4 ~ 12	2 ~ 6 (M3 ~ M6)	2 ~ 12 (M4 ~ M12)	3 ~ 12
	铜、铝及其合金	2 ~ 4	3 ~ 8	3 ~ 8	—	—	—
螺柱长度 /mm	间隙式焊枪	≤100	≤100	≤100	—	—	—
	接触式焊枪	100 ~ 300	100 ~ 300	100 ~ 300	—	—	—
焊接生产率/(个/min)		15	10	10	10	5	8
重量/kg		~35	~80	~100	28		30
外形尺寸/mm (长×宽×高)		—	—	—	480×280×350	1000×500×1200	850×450×780

(2) 焊枪 有手持式和固定式两种类型。由于电容放电螺柱焊三种焊接方法的程序不同，因而焊枪内部结构各异。

预接触式焊枪结构简单，由螺柱夹持机构和将螺柱压入熔池的弹簧压下机构组成；预留间隙式焊枪则需增加提升螺柱的机构，通常是采用电磁线圈，施焊前线圈起作用使螺柱悬在工件上方，施焊时，线圈断电，由弹簧使螺柱移向工件；拉弧式焊枪的结构与电弧螺柱焊枪类似。拉弧式手持电容放电螺柱焊枪结构示意图如图 1-8-34 所示。

5. 短周期螺柱焊焊接过程

短周期螺柱焊是普通电弧螺柱焊的一种特殊形式。其焊接过程也是由短路—提升—焊接—落钉—有电顶锻几个过程组成，焊接时间只有电弧螺柱焊的 1/10 到几十分之一，所以称为短周期或短时间螺柱焊。具体分为如下过程。

- 1) 螺柱下落与工件定位短路。起动焊枪开关，螺柱与工件间通电。
- 2) 螺柱提升，引燃小电弧，此时电弧电流为 I_p ，小电弧清理螺柱端部与工件表面。
- 3) 延时数十毫秒后大电流自动接通，焊接电弧发生，工件形成熔池，螺柱端部形成熔化层。

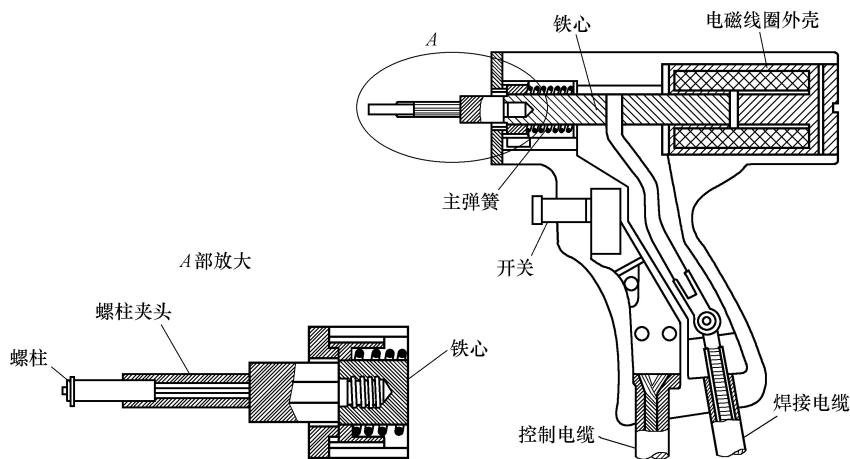


图 1-8-34 电容储能螺柱焊枪

- 4) 螺钉、螺柱端部浸入熔池，电弧熄灭。同时焊枪的电磁铁释放弹簧压力在螺柱上。
- 5) 接头形成，焊接结束。整个焊接过程不超过 100ms。

6. 短周期螺柱焊焊接设备

短周期螺柱焊成套设备包括电源、控制装置、送料机等及焊枪，其中电源和控制装置是装在同一箱体内。短周期螺柱焊电源可以是整流器、电容器组，也可以是逆变器。一般情况下是两个电源并联分别为先导电弧及焊接电弧供电。只有逆变器作电源时可以采用一个电源。经过调制为电弧分别提供先导电流与焊接电流。图 1-8-35 是两个整流器组成的螺柱焊电源。整流器 ZL_2 为螺柱提供先导电流 I_p ， ZL_1 为螺柱提供焊接电流 I_w ，输出图 1-8-36 所示的电流电压波形。

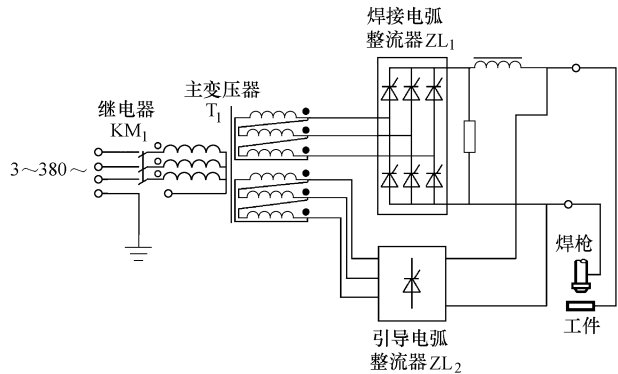


图 1-8-35 两个整流器供电的螺柱焊电源

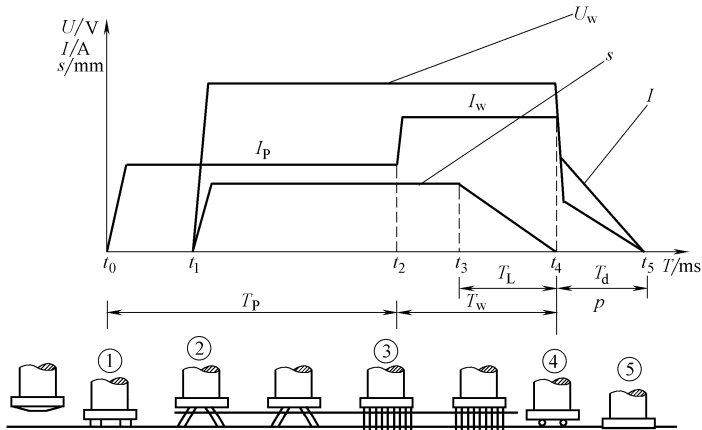


图 1-8-36 短周期螺柱焊工作循环图

I_w —焊接电流 (A) U_w —电弧电压 (V) T_w —焊接时间 (ms) T_d —有电顶锻阶段 (ms) I_p —先导电流 (A)
 s —螺柱位移 (mm) T_p —先导电弧时间 (ms) T_L —落钉时间 (ms) p —焊枪中弹簧对螺柱压力 (N)

8.3.2 典型材料的螺柱焊焊接性能

螺柱焊中应用最多的材料是低碳钢、高强度钢、不锈钢和铝合金。表 1-8-4 列出了可焊的母材和相应的螺柱材料。

表 1-8-4 电弧螺柱焊、螺柱与母材的材料组合

母 材	螺 柱	母 材	螺 柱
低碳钢	低碳钢、奥氏体不锈钢	铝合金	铝合金
奥氏体不锈钢	低碳钢、奥氏体不锈钢		

工业上最常用的螺柱材料是低碳钢、高强度钢、不锈钢和铝，其最低抗拉强度见表 1-8-5。螺柱的外形必须是焊枪能夹持并顺利地进行焊接，其端径受母材厚度限制，其范围见表 1-8-5。

表 1-8-5 电弧螺柱焊焊接接头最低抗拉强度

螺柱材料	螺柱端径范围/mm	接头抗拉强度/MPa
低碳钢	3 ~ 32	415
高强度钢	3 ~ 32	830
不锈钢	3 ~ 19	585
铝	6 ~ 13	275

钢的螺柱焊时，为了脱氧和稳弧，常在螺柱端部中心处（约在焊接点 2.5mm 范围内）放一定量的焊剂。对于直径小于 6mm 的螺柱，若无特定的应用场合，则不需要焊剂。

铝螺柱端做成尖端，以利于引弧，但不需要加焊剂。因为电弧螺柱焊以及拉弧式电容放电螺柱焊的焊接时间较长，为了防止焊缝金属氧化并稳定电弧采用惰性气体保护。

8.3.3 螺柱焊焊接方法的选择

电容放电螺柱焊、电弧螺柱焊及短周期螺柱焊三类焊接方法的选择和应用既有共同之处又有各自最佳的应用范围。比较难选择的是电容放电螺柱焊的三种方法，即预接触法、预留间隙法及拉弧法。选择的依据是被焊工件的厚度、材质、紧固件的尺寸。焊接方法的选择说明如下：

1) 螺柱直径大于 8mm 的一般是受力接头，适合采用电弧螺柱焊方法，虽然电弧螺柱焊可焊直径 3 ~ 25（mm）的螺柱，但 8mm 以下采用其他方法如电容放电螺柱焊或短周期螺柱焊更为合适。

2) 工件厚度 δ 和螺柱直径 d 有一定的比例关系，对电弧螺柱焊 $d/\delta = 3 \sim 4$ ，对电容放电螺柱焊和短周期螺柱焊这个比例可以达 8 ~ 10。厚度 3mm 以下最好采用电容放电螺柱焊或短周期螺柱焊，而不要采用电弧螺柱焊。

3) 对于碳钢、不锈钢及铝合金，电弧螺柱焊、电容放电螺柱焊及短周期螺柱焊都可以选用。但对铝合金、铜及涂层钢板薄板或异种金属材料螺柱焊最好选用电容放电螺柱焊。

4) 对于电容放电螺柱焊为最佳焊接方法，电容放电螺柱焊三种焊接方法有共同的适用范围，应按以下原则选择：

① 预接触式焊接方法仅适用于移动式设备，而且主要用于焊接碳钢和把碳钢螺柱焊到镀层钢板上。

② 预留间隙式可用于手提式或固定式设备。用于焊接碳钢、不锈钢及铝合金，还可以焊接异种金属材料，但焊铝过程需用惰性气体保护。

③ 拉弧式焊接方法所焊接材料和设备与预留间隙式相同，但螺柱可以不需特制凸台。这种方法最适于带自动送料系统的批量焊接。焊铝时需要惰性气体保护。

④ 对薄板（1.0mm 以下）、要求接头背面设有凸痕的使用条件，只有预留间隙式及预接触式

焊接可以进行。各种螺柱焊方法的分类与特点见表 1-8-6。

表 1-8-6 螺柱焊方法的分类与特点

序号	项目	电容放电螺柱焊			电弧螺柱焊	短周期螺柱焊
		预接触式	预留间隙式	拉弧式		
1	焊接时间/ms	1 ~ 3	1 ~ 3	4 ~ 10	100 ~ 2000	20 ~ 100
2	可焊螺柱直径/mm	3 ~ 10	3 ~ 10	3 ~ 10	3 ~ 25	3 ~ 10
3	可焊板厚/mm	0.3 ~ 3.0	0.3 ~ 3.0	0.3 ~ 3.0	3 ~ 30	0.4 ~ 3
4	熔池深度/mm	<0.2	<0.2	<0.2	2.5 ~ 5	<0.2
5	d/δ	8	8	8	3 ~ 4	8
6	生产率/(个/min)	2 ~ 15	2 ~ 15	手动 2 ~ 15 自动 40 ~ 60	2 ~ 15	手动 2 ~ 15 自动 40 ~ 60
7	可焊金属材料	碳钢、不锈钢、 镀层钢板	碳钢、不锈钢、 铝合金、铜合金	碳钢、不锈钢、 铝合金	碳钢	碳钢、不锈钢、 铝合金
8	螺柱端部形状	圆法兰和凸台	圆法兰和凸台	圆法兰、平头钉	圆、方、异形均可 加工成锥形	圆法兰、平头钉
9	设备特点	移动式	固定式	固定式或移动式	移动式	固定式或移动式
10	可否实现自动化	不可能	不可能	可以	不可能	可以
11	应用特点	焊薄板(黑色 金属、不锈钢) 背面无凸痕	薄板(铝合金、 黑色金属、不锈钢、 镀锌钢板、铜合金) 背面无凸痕	薄板(黑色金属、 镀层钢板)批量 自动化生产	厚板、大直径 (黑色金属)不能实 现自动化生产	薄板、中厚板 (黑色金属、不 锈钢、铝合金) 批量自动化生产
12	对工件表面要求	焊前清理油污等	焊前清理油污等	不用处理	不用处理	不用处理

8.3.4 螺柱焊焊接质量检验及焊接专用螺柱

1. 接头质量检验

螺柱焊接头的质量检验方法通过外观检验、金相检验和力学性能试验等措施进行接头的质量检验。

(1) 外观检验 只有钢制螺柱的电弧螺柱焊的接头可以进行外观检验，主要检查其端部焊缝的连续性、均匀性与熔合情况以判断焊缝是否有缺陷，电弧螺柱焊容易出现的问题有螺柱未插入熔池而悬空、热量不足、过热、磁偏吹、螺柱不垂直于工件等。

对电容放电螺柱焊及短周期螺柱焊接头外观检验几乎没有意义，因为熔池极浅，接头是塑性连接，没有重结晶的焊缝。但是，这种方法有特殊使用要求的要进行外观检查，其特殊要求是：不锈钢薄板螺柱焊时不锈钢背面的烧痕是否明显影响其装饰性能，低碳钢、不锈钢及铝合金薄板焊点背后凸痕是否符合使用条件，通过调整焊接参数解决，如减小焊接时间、增大焊接电流等。

(2) 金相组织分析 只有电弧螺柱焊焊接接头有必要进行宏观接头金相组织分析，以检查熔合情况及裂纹等缺陷。对电容放电及短周期螺柱焊没有必要。

(3) 力学性能试验 是否进行力学性能试验要根据使用条件而定。力学性能试验应当在焊接生产前的工艺评定试样上进行，以确定最佳焊接工艺，同时也在生产现场随机抽查进行。所采用的力学性能试验方法有现场锤击、现场弯曲试验及接头拉伸和扭转试验。对电容放电螺柱焊及短周期螺柱焊一般只进行锤击试验与弯曲试验，因为都不是承载接头。有些炉窑或锅炉制造中仅用螺柱固定保温材料，则任何力学试验都不用进行。弯曲试验是自制套筒插到接头的螺柱上进行弯曲，钢螺柱弯曲 75°，铝合金螺柱弯曲 15°，肉眼观察无开裂即为合格。锤击也是未出现可见开裂为合格。扭转试验用扭矩扳手加预定载荷，可测定是否达到了强度要求。这些要求是产品技术条件所规定或企业质量管理规范中所规定的。

2. 焊接专用螺柱

螺柱焊专用螺柱几乎可以是任何形状的冲压件，如圆柱状（带螺纹或不带螺纹）、方形、矩形、锥形等，但它必须适合于装夹，而且焊接端必须是圆形的。螺柱的直径为 1.6 ~ 13mm，但多在 3 ~ 10mm 范围内。

对预接触式和预留间隙式电容放电螺柱焊螺柱，需在焊接端设计尖顶或有一个小凸台。标准的凸台为圆柱形，一些特定用途，采用圆锥形。焊接端略呈锥形是为了便于排出焊接过程中产生的膨胀气体。通常焊接端底部直径比螺柱体大，一般设计成凸缘。这样焊缝的面积大于螺柱的横截面积，以保证接头强度等于或大于螺柱的强度。为了提高生产效率，螺柱的形状和尺寸应尽量规格化和标准化，表 1-8-7 推荐了两种螺柱的形状和尺寸。

表 1-8-7 推荐的螺柱形状和尺寸 (单位: mm)

带螺纹

不带螺纹

D	L + 0.2	D1 ± 0.2	D2 ± 0.08	L1 ± 0.05	H	N 最大	α ± 1	D	L + 0.2	D1 ± 0.2	D2 ± 0.08	L1 ± 0.05	H	α ± 1
M3	6 ~ 30	4.5	0.65	0.55	0.7 ~ 1.4	1.5	3°	Φ3	6 ~ 30	5.0	0.65	0.55	0.7 ~ 1.4	3°
M4	6 ~ 40	5.5				Φ4		6 ~ 40	6.0					
M5	6 ~ 45	6.5	0.75	0.80				Φ5	6 ~ 45	7.0				
M6	8 ~ 50	7.5						Φ6	8 ~ 50	7.5				
M8	10 ~ 55	9.0						Φ7.1	10 ~ 55	9.0				

拉弧式电容放电螺柱焊用的螺柱焊端不需设计成尖顶或凸台，但需加工成锥形或略呈球面形，这样电弧在螺柱中心部位引燃。其底部也设计成带肩（凸缘）的形状。与电弧螺柱焊相比，电容放电螺柱焊的螺柱熔耗量很小，通常在 0.2 ~ 0.4mm 范围。熔化所产生的缩短量几乎可忽略。

电弧螺柱焊用的螺柱的长度必须考虑焊接过程产生的缩短量。因为焊接时螺柱和母材金属熔化，随后熔化金属从接头处被挤出，所以螺柱总长度要缩短。表 1-8-8 给出了电弧螺柱焊时螺柱缩短量的典型值。

表 1-8-8 螺柱缩短量典型值

螺柱直径/mm	5 ~ 12	16 ~ 22	≥25
长度缩短量/mm	3	5	5 ~ 6

8.4 碳弧气刨设备及工艺特点

在金属结构的生产中，有时候需要将某些金属切割成符合要求的形状、坡口，在金属结构件维修过程中还要进行焊接缺陷的清除、焊缝的清根、局部件的切除，碳弧气刨无疑是普遍采用的一种工艺方法。它是属于一种电弧切割的方法，是应用电弧热以及气流的吹力对局部金属件进行切割或刨削工艺达到去除局部金属目的的方法。

8.4.1 碳弧气刨的原理、特点及应用

1. 碳弧气刨原理

碳弧气刨是利用碳棒或者石墨棒作为电极，与工件之间产生电弧，把金属局部加热到熔化状态，同时利用压缩空气的高速气流把这些熔化金属吹掉，从而实现对金属进行刨削和切割的一种热加工工艺。在焊接生产中主要用来刨槽、清除焊缝缺陷和背面清根。其工作原理如图 1-8-37 所示。

2. 碳弧气刨的特点

与用风铲、砂轮加工相比，碳弧气刨有下列特点。

1) 手工碳弧气刨时，灵活性很大，可操作性较好，可进行全位置操作；在狭窄工位或可达性差的部位，碳弧气刨仍可使用。

2) 在清除焊缝或铸件的缺陷时，在电弧下可清楚地观察到缺陷的形状和深度，有利于清除缺陷，用风铲或砂轮难以达到。

3) 噪声小，效率高。用自动碳弧气刨时，具有较高的精度，可减轻劳动强度。

4) 碳弧气刨也有明显的缺点，如产生烟雾、粉尘污染和弧光辐射，此外，操作不当容易引起槽道增碳。

5) 与等离子弧气刨相比，设备简单，压缩空气容易获得且成本低。

3. 碳弧气刨的应用

(1) 挑焊根 双面焊时，用于清除背面焊根。

(2) 清除缺陷 清除焊缝中或铸件的飞边、飞刺、浇冒口和铸件中的缺陷。

(3) 开坡口 自动碳弧气刨用于加工较直的直缝和环缝坡口；手工碳弧气刨用于加工单件的或不规则焊缝的坡口。

(4) 切割 切割高合金钢、铝、铜及其合金。

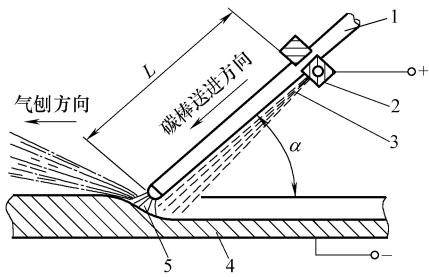


图 1-8-37 碳弧气刨工作原理示意图

1—碳棒 2—气刨枪夹头 3—压缩空气 4—工件
5—电弧 L—碳棒外伸长 α—碳棒与工件夹角

8.4.2 碳弧气刨的设备及材料

1. 碳弧气刨设备

碳弧气刨设备系统主要由碳弧电源、气刨枪、碳棒、电缆、气管以及压缩空气源等组成，如图 1-8-38 所示。

(1) 碳弧气刨电源 碳弧气刨电源一般采用具有陡降外特性且动特性较好的手工直流电弧焊电源。由于碳弧气刨一般使用的电流比较大，并且连续工作时间比较长，因此应选用功率较大的焊机。例如，当使用 $\phi 7\text{mm}$ 的碳棒时，碳弧气刨的电流为 350A，故宜选用额定电流为 500A 的手工直流焊机作为电源。工频交流焊条电弧焊焊机由于电流过零时间较长，会引起电弧不稳定，在实际生产中一般并不用于碳弧气刨；近年来研制成功的交流方波焊接电源的过零时间极短，且动特性和控制性能优良，可应用于碳弧气刨。

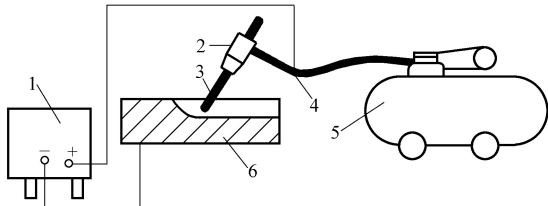


图 1-8-38 碳弧气刨设备系统示意图

1—电源 2—气刨枪 3—碳棒
4—电缆气管 5—空气压缩机 6—工件

(2) 气刨枪 气刨枪是碳弧气刨的主要工具。应具备电极夹头导电良好、夹持电极牢靠、外

壳绝缘及绝热性能良好、更换电极方便、压缩空气喷射集中而准确、轻便灵巧等特点。碳弧气刨枪是在焊条电弧焊焊钳的基础上，增加了压缩空气的进气管和喷嘴而制成。碳弧气刨枪按压缩空气的喷射方式分为侧面送气和圆周送气式两种类型。

1) 侧面送气气刨枪：侧面送气气刨枪的优点是结构简单，压缩空气紧贴碳棒喷出，碳棒长度调节方便，各种直径的圆碳棒和矩形碳棒均适用；缺点是只能向左或向右单一方向进行刨削。其结构如图 1-8-39 所示，侧面送气气刨枪的喷嘴结构如图 1-8-40 所示。

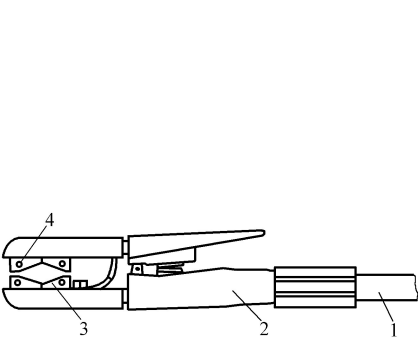


图 1-8-39 侧面送气气刨枪结构示意图
1—电缆气管 2—气刨枪体 3—喷嘴 4—喷气孔

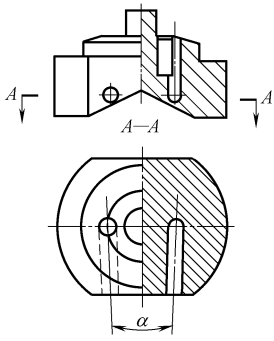


图 1-8-40 侧面送气气刨枪喷嘴结构示意图

2) 圆周送气气刨枪：圆周送气气刨枪只是喷嘴的结构与侧面送气气刨枪有所不同。其喷嘴结构如图 1-8-41 所示。圆周送气气刨枪的优点是喷嘴外部与工件绝缘，压缩空气由碳棒四周喷出。碳棒冷却均匀，适合在各个方向操作。缺点是结构比较复杂。

(3) 碳棒 碳棒是由碳、石墨加上适当的粘结剂，通过挤压成形，焙烤后镀一层铜而制成的。焊接生产中常用的碳棒有圆碳棒和矩形（扁）碳棒两种。前者用于焊缝清根、背面开槽及清除焊接缺陷等，后者用于刨除焊件上的临时焊道和焊疤、清除焊缝余高和焊瘤，有时也用作碳弧切割。

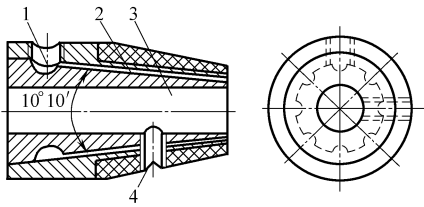


图 1-8-41 圆周送气气刨枪喷嘴结构示意图
1—电缆气管的螺孔 2—气道
3—碳棒孔 4—紧固碳棒的螺孔

对碳棒的要求是导电性良好、耐高温、不易折断、价格低廉，使用时散发烟雾及粉尘少。一般采用镀铜实心碳棒，镀铜层厚度为 0.3 ~ 0.4mm。碳棒的质量和规格由国家标准规定。表 1-8-9 列出碳棒的型号和规格，表 1-8-10 为各种规格碳棒的额定工作电流。

表 1-8-9 碳棒的型号和规格（摘自 JB/T 8154—2006）

型 号	截 面 形 状	规格尺寸/mm		
		直径	截面	长度
B505 ~ B514	圆形	5、6、7、8、9、10、12、14	—	305、355
B5412 ~ B5620	矩形	—	4 × 12 5 × 12	305
			5 × 12 5 × 15	
			5 × 18 5 × 20	355
			5 × 25 6 × 20	

表 1-8-10 碳棒的额定工作电流值（摘自 JB/T 8154—2006）

圆形碳棒规格/mm	—	5	6	7	8	9	10	12	14
额定电流值/A	—	225	325	350	400	500	550	850	1000
矩形碳棒规格/mm	4×12	5×10	5×12	5×15	5×18	5×20	5×25	6×20	—
额定电流值/A	200	250	300	350	400	450	500	600	—

注：1. 操作时的实际电流不超过额定电流的±10%。
2. 操作时的空气压力为0.5~0.6MPa。

8.4.3 碳弧气刨工艺及其参数匹配

碳弧气刨工艺参数的选择主要结合以下几个方面来考虑并匹配。

1. 碳弧电源极性

碳弧气刨一般采用直流反接（工件接负极）。这样气刨时电弧稳定，熔化金属的流动性较好，凝固温度较低，因此刨削过程稳定，速度均匀，电弧发出连续的“刷刷”声，刨槽宽窄一致，表面光洁。反之则电弧不稳且发出断续的“嘟嘟”声。

2. 碳弧电流与碳棒直径

碳弧电流与碳棒直径成正比关系，一般可参照下面的经验公式选择电流：

$$I = (30 \sim 50) D$$

式中 I ——电流，单位为 A；

D ——碳棒直径，单位为 mm。

对于一定直径的碳棒，如果电流较小，则电弧不稳，且易产生夹碳缺陷；适当增大电流，可提高刨削速度、刨槽表面光滑、宽度增大。实际应用中，一般选用较大的电流，但电流过大时，碳棒易发红，烧损很快，镀铜皮脱落，甚至碳棒熔化，造成严重渗碳。

碳棒直径的选择一般按工件厚度来确定。但也要考虑槽宽的需要。通常碳棒直径应比所要求刨槽宽度小2~4mm，碳棒直径的选择见表 1-8-11。

表 1-8-11 碳棒直径的选择

钢板厚度/mm	碳棒直径/mm	钢板厚度/mm	碳棒直径/mm
4~6	4	>10	7~10
6~8	5~6	>18	10
8~12	6~7		

3. 刨削速度

刨削速度影响刨槽尺寸、表面质量以及刨削过程的稳定性。刨削速度必须与气刨电流大小和刨槽深度相匹配。若速度太快，易造成碳棒与金属短路、电弧熄灭，使碳棒粘在刨槽顶端，形成“夹碳”缺陷。故一般刨削速度以0.5~1.2m/min为宜。

4. 压缩空气压力

压缩空气压力直接影响刨削速度和刨槽的表面质量。提高压缩空气压力则切削能力增强，可提高刨削速度和刨槽表面的光滑程度。一般要求压缩空气的压力为0.4~0.6MPa。压力低于0.4MPa，熔融金属难以全部吹除，影响刨削正常进行，效率明显降低，且槽道表面粗糙，渗碳层增厚。大电流气刨时，金属熔化量增加，要求压缩空气压力和流量也相应增加。

5. 碳棒外伸长度

碳棒从导电嘴到碳棒燃弧端的长度为外伸长。手工碳弧气刨时，外伸长度过大，压缩空气喷嘴离电弧远，造成风力不足，难以将熔渣顺利吹除，且碳棒易发红折断。一般外伸长度以80~100mm为宜。随着碳棒逐渐烧损，碳棒的外伸长不断减少，当外伸长减少至20~30mm时，就必须重新调整。

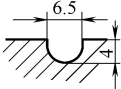
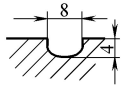
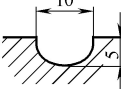
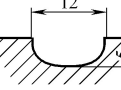
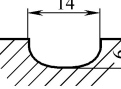
6. 碳棒与工件倾角

碳棒与工件倾角 α 大小会影响刨削深度和刨削速度。倾角增大，则刨削深度增加但刨削速度减小。一般以 $\alpha = 45^\circ$ 左右为宜。

7. 碳弧长度

碳弧气刨时，弧长过大，电弧不稳定，易造成熄弧或槽道不整齐，故一般以弧长 1 ~ 2mm 为宜。弧短一些有利于提高生产效率，但过短又易引起“夹碳”缺陷。碳弧气刨的工艺参数见表1-8-12。

表 1-8-12 碳弧气刨的工艺参数

类别	碳棒规格/mm	电流/A	碳弧气刨速度 /(m/min)	槽的形状	使用范围
圆碳棒	$\phi 5$	250	—		用于厚度 4 ~ 7mm 板
	$\phi 6$	280 ~ 300	—		
	$\phi 7$	300 ~ 350	1.0 ~ 1.2		
	$\phi 8$	350 ~ 400	0.7 ~ 1.0		用于厚度 8 ~ 24mm 板
	$\phi 10$	450 ~ 500	0.4 ~ 0.6		—
扁碳棒	4 × 12	350 ~ 400	0.8 ~ 1.2	—	—
	5 × 20	450 ~ 480	0.8 ~ 1.2		
	5 × 25	550 ~ 600	0.8 ~ 1.2		

8.4.4 自动碳弧气刨特点及其设备

平直焊缝的背面刨槽或圆筒体环缝的焊根刨槽可以采用半自动或自动碳弧气刨，以减轻劳动强度，提高刨削质量和生产效率。在半自动碳弧气刨中，只有碳棒自动地送给，其余工作仍需工人操作和控制；自动碳弧气刨除碳棒能自动进给外，气刨枪借助小车可沿预定轨道以一定的速度自动地移动，完成刨削工作。若小车套在柔性的磁轨道上，就可以实现平、横、立、仰各种位置的自动气刨工作。

1. 自动碳弧气刨特点

- 1) 气刨小车和碳棒送进机构可自动控制、无级调速。
- 2) 刨槽的精度高、稳定性好。
- 3) 刨槽平滑均匀、刨槽边缘变形小。
- 4) 刨削速度比手工气刨速度高 5 倍左右。
- 5) 碳棒消耗量比手工碳弧气刨少。

2. 自动碳弧气刨设备

自动碳弧气刨机与全位置行走机构配套系统如图 1-8-42 所示。该机气刨小车行走和碳棒送给机构均可自动控制、无级调速；碳棒送给机构有自动反馈系统，可随时调节送给速度。

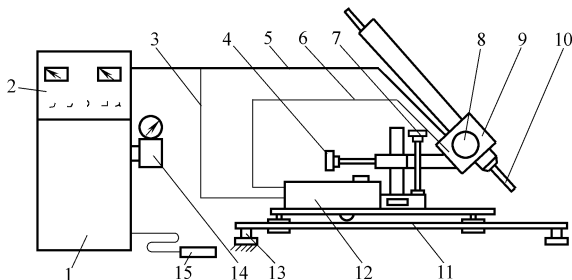


图 1-8-42 自动碳弧气刨机与全位置行走机构配套系统示意图

- 1—主电路接触器（箱内） 2—控制箱 3—牵引爬行器电缆 4—水平调节器 5—电缆气管 6—电动机控制电缆
7—垂直调节器 8—伺服电动机 9—气刨头 10—碳棒 11—轨道 12—牵引爬行器 13—定位磁铁
14—压缩空气调压器 15—遥控器

该机的主要技术数据如下：碳棒直径： $\phi 8 \sim \phi 19\text{mm}$ ；压缩空气压力： 0.42MPa ；刨槽宽度： $11 \sim 29\text{mm}$

气刨电流： $350 \sim 1600\text{A}$ ；刨削速度： $320 \sim 1650\text{mm/min}$ ；一次刨槽深度： $3 \sim 31\text{mm}$ 。

8.4.5 碳弧水气刨

碳弧气刨产生的烟雾和粉尘严重污染环境，影响工人的身体健康，特别是在密闭的容器内操作，情况更为恶劣，采用一般的通风措施都不能解决问题。为了控制碳弧气刨引起的烟雾和粉尘污染，根据水喷雾可以消烟灭尘的道理，有些工厂应用了碳弧水气刨。

1. 碳弧水气刨设备

碳弧水气刨设备类似碳弧气刨设备，但增加了一个供水器和供水系统。碳弧水气刨设备示意图如图 1-8-43 所示。

供水器是提供水雾的装置，结构如图 1-8-44 所示。压缩空气经压缩空气进气管 1 与容器连通，水经进水管 3 注入容器 2 内，水面达到 H 高度（低于压缩空气出气管 4 的底部）后，关闭进水阀门。此时打开压缩空气出气管 4 的阀门，就有压缩空气从出气管排出。再打开出水管 5 的阀门，就有压力水从出水管喷出。若同时打开管 4 和管 5，压缩空气和压力水经水、气混合三通 6 混合，从而喷射出压缩空气和水雾。调节压缩空气出气管 4 的阀门和出水管 5 的阀门，可改变风量及水雾大小。当供水器内水面高度低于 h 时，就喷不出水雾，水在工作中呈雾状，消耗量较少，一次灌注可用数日。

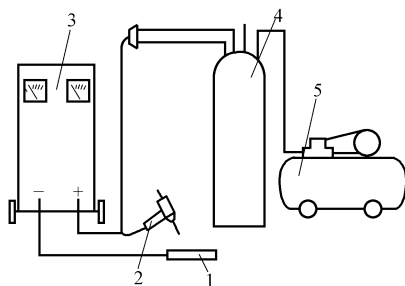


图 1-8-43 碳弧水气刨设备示意图

- 1—工件 2—气刨枪 3—电源
4—供水器 5—空气压缩机

碳弧水气刨的关键在于制造合理的供水器，以获得均匀弥散的水雾。但还必须注意压缩空气与压力水混合的三通接头，应该使它尽可能地靠近气刨枪（一般在 10mm 以内），这样才能保证气刨枪喷出挺拔的水雾。将碳弧气刨枪稍做改造即可作为碳弧水气刨枪。例如，将圆周送气气刨枪的内体和外套在左端尾部钎焊以保密封，同时将内体上的气道内径由 1mm 改为 1.5mm ，如图 1-8-45 所示。

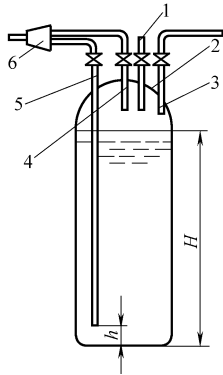


图 1-8-44 供水器结构示意图
1—压缩空气进气管 2—容器 3—进水管
4—压缩空气出气管 5—出水管 6—水、气混合三通

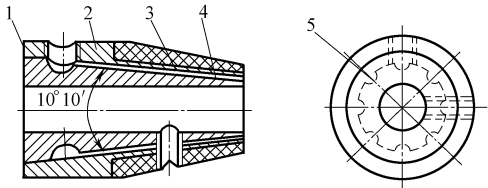


图 1-8-45 碳弧水气刨枪
1—钎焊处 2—内体 3—绝缘处套
4—内体 5—气道

2. 碳弧水气刨工艺参数

根据试验和生产试用，推荐参考工艺参数如下。

碳棒直径： $\phi 7\text{mm}$ 。

碳棒外伸长：70 ~ 90mm。

压缩空气压力：0.45 ~ 0.6MPa。

气刨电流：400 ~ 500A。

刨槽深度：4 ~ 6mm。

刨槽宽度：9 ~ 11mm。

碳弧水气刨时，水雾的主要作用是除尘，也对工件有一定的冷却作用，这种冷却作用对材料的组织和性能没有大的影响。对 Q345（16Mn）、15CrMo 和 12Cr19Ni9 钢所做试验结果表明，采用碳弧气刨或碳弧水气刨时，其刨槽表面的金相组织没有明显的差别。

对于刨坡口或清焊根来说，焊前要用砂轮将刨槽表面打磨干净，淬硬层即使未被全部磨掉，在其后的焊接过程中也会被重新熔化，因而对焊缝性能没有明显的影响。

3. 粉尘测定

关于粉尘的测定数据详见表 1-8-13。

表 1-8-13 粉尘的测定数据

测定部位	粉尘测定量/(mg/m^3)		粉尘下降为无水时的
	碳弧气刨	碳弧水气刨	
焊工施刨的试板正前方 1m、高 0.5m	56.3	13.8	1/4.1
焊工施刨的试板后方头盔部位	11.5	1.15	1/10

由表 1-8-13 数据可见，碳弧水气刨对于粉尘的优越性是明显的。如果在密闭容器内进行气刨，碳弧水气刨的优越性就更加明显。

参考文献

[1] 史耀武. 中国材料工程大典：第 22 卷 材料焊接工程（上）[M]. 北京：化学工业出版社，2006.
[2] [英国] 焊接研究所，[乌克兰] 巴顿电焊研究所. 水下湿式焊接与切割 [M]. 焦向东，周灿丰，沈秋平，等译. 北京：石油工业出版社，2007.
[3] 宋宝天. 水下焊接与切割 [M]. 北京：机械工业出版社，1989.

- [4] 约翰 H·尼克松. 水下焊接修复技术 [M]. 房晓明, 周灿丰, 焦向东, 译. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- [5] 梅福欣, 俞尚知. 水下焊接与切割译文集 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [6] 续守诚, 贝全荣. 水下焊接与切割技术 [M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
- [7] IBARRA S, GRUBBS C E, OLSON D L. Metallurgical Aspects of Underwater Welding [J]. Journal of Metals, 1988 (12): 8-10.
- [8] Suga Y, Hasui A. On Formation of Porosity in Underwater Weld Metal (The 1st Report) [J]. Transactions of the Japan Welding Society, 1986, 17 (1): 58-64.
- [9] 刘世明, 沈晓勤. 深水湿法焊接气孔问题研究 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 1997, 25 (3): 12-17.
- [10] Sanchez O, Liu S, Ibarra S. Designing Shielded Metal Arc Consumables for Underwater Wet Welding in Off-shore Applications [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 1995, 117 (3): 212-220.
- [11] Rowe M and Liu S. Recent Developments in Underwater Wet Welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining. 2001, 6 (6): 387-396.
- [12] SAKURADA D, KATOH K and TOKISUE H. Underwater Friction Welding of 6061 Aluminum Alloy [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 2002, 52 (1): 2-6.
- [13] 史耀武, 张新平, 雷永平. 严酷条件下的焊接技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [14] 许亮斌, 陈国明. 近海水下结构无损检测新技术 [J]. 无损检测, 2003, 25 (7): 360-364.
- [15] 程志虎. 水下无损检测技术综述 [J]. 无损检测, 1997, 19 (9): 266-269.
- [16] 杜文博, 朱胜, 孟凡军. 水下切割技术研究及应用进展 [J]. 焊接技术, 2009, 38 (10): 1-5.
- [17] 贝全荣. 水下氧弧切割技术及其应用 [J]. 大坝与安全, 2007 (1): 70-74.
- [18] 朱华, 花银群. 水下激光切割质量影响因素的研究 [J]. 激光杂志, 2007, 28 (3): 73-74.
- [19] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册: 第1, 2, 3卷 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [20] 美国焊接学会. 焊接手册: 第1, 2, 3, 4卷 [M]. 7版. 清华大学焊接教研室, 译. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [21] 机械工业部. 电焊机产品样本 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [22] 美国金属学会. 金属手册: 第六卷, 焊接、硬钎焊、软钎焊 [M]. 9版. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [23] 任玉, 李静. 一种新型引弧式电容放电螺柱焊机 [J]. 电焊机, 1999, 29 (11): 5-9.
- [24] 张义, 李洪文. 国内外螺柱焊接技术的发展趋势 [J]. 焊接, 1999 (11): 8-11.
- [25] Andreas W E. Nentwing, Factors of influence determining quality in short-time stud welding of steel and aluminium [J]. Welding &Cutting, 1996, 48 (10): 763-769.
- [26] 伍国炎. 螺柱焊机的研究与应用 [J]. 造船技术, 1995 (5): 28-34.
- [27] 吴润辉. 船舶焊接工艺 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1996.
- [28] 焊工手册编写小组. 焊工手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [29] 中国机械工程学会焊接学会. 焊工手册: 手工焊接与切割: 修订版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [30] 陈祝年. 焊接工程师手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [31] 王文其. 焊接新技术新工艺实用指导手册 [M]. 哈尔滨: 黑龙江文化电子音像出版社, 2007.

第 2 篇

»» 压焊基础

压焊是焊接科学技术的重要组成部分之一，广泛应用于航空、航天、核能、信息工程、汽车制造、轨道工程等工业部门。统计资料表明，用压焊完成的焊接量，每年约占世界总焊接量的 1/3，并有继续增加的趋势。

压焊（Pressure Welding, PW）是指焊接过程中，必须对焊件施加压力（加热或不加热），以完成焊接的方法。

第 1 章 压焊基础概述

本章在介绍压焊（Pressure Welding, PW）的物理本质的基础上，简述压焊的分类及其发展。

1.1 压焊的物理本质

众所周知，焊接过程的本质就是通过适当的物理-化学过程，使两个分离表面的金属原子接近到晶格距离（0.3~0.5nm），形成金属键，从而使两金属连为一体，达到焊接的目的。这一适当的物理-化学过程，在压焊中是通过对接区施加一定的压力而实现的。压力的大小同材料的种类、所处温度、焊接环境和介质等有关，而压力的性质可以是静压力、冲击压力或爆炸力。

在少数压焊过程中（点焊、缝焊等），焊接区金属熔化并同时被施加压力，发生加热→熔化→冶金反应→凝固→固态相变→形成接头的过程，类似于熔焊。但是，由于有压力的作用，提高了焊接接头的质量。

多数压焊过程中，焊接区金属仍处于固相状态，依赖于在压力（不加热或伴以加热）作用下产生的塑性变形、再结晶和扩散等作用形成接头。这里强调了压力对形成接头的主导作用。但是，对加热可促进焊接过程的进行和更易于实现焊接，也应予以充分注意。因为加热可提高金属的塑性，降低金属变形阻力，显著减小所需压力。同时，加热又能增加金属原子的活动能力和扩散速度，促进原子间的相互作用。例如，铝在室温下其对接端面的变形度要达到 60% 以上才可以实现焊接（冷压焊），而当对接端面被加热至 400℃ 时，则只需 8% 的变形度就能实现焊接（电阻对焊）。当然，此时所施加的压力也将大为降低。压力和加热温度之间存在着一定关系，如图 2-1-1 所示，焊接区金属加热的温度越低，实现焊接所需的压力就越大。显然，冷压焊时所需压力为最大，扩散焊时为最小，而熔焊时则不需要压力。一般来说，这种固相焊接接头的质量，主要取决于对表面氧化膜（室温下其厚度为 1~5nm）和其他不洁物在焊接过程中被清除的程度，并总是与接头部位的温度、压力、变形和若干场合下的其他因素（如超声波焊接时的摩擦、扩散焊时的真空度等）有关。

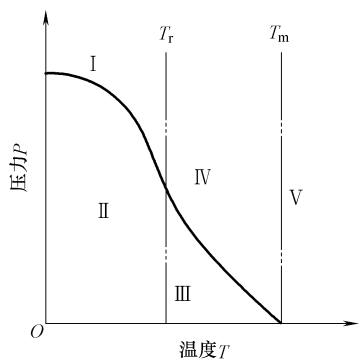


图 2-1-1 压力与加热温度的关系

I—冷压焊区 II—非焊接区 III—扩散焊区
IV—热压焊区 V—熔焊区
 T_m —熔点 T_r —再结晶温度

1.2 压焊的分类及发展

依照“族系法”分类规则，根据主要工艺特征，将压焊分为图 2-1-2 所示的十大类。然后，进一步根据其他特征（如接头形式、电源种类、加压方式、气体氛围等）又可将每一大类细分为若干小类。例如电阻焊（大类）可分为以下工艺方法：点焊、凸焊、缝焊、对焊、对接缝焊等，摩擦焊等其他大类方法也可细分。

压焊具有悠久的历史，早在春秋战国时期，我们的先人已经懂得以黄泥作助熔剂，用加热锻打的方法把两块金属连接在一起，这就是最古老的压焊方法锻焊。有明确记载的是 1885 年美国 E·

汤姆逊 (Elihu Thomson) 教授取得的电阻对焊专利及 1886 年生产出第一台电阻对焊机, 这是压焊历史的开始。1903 年德国人首先使用了闪光对焊。以后相继诞生了高频感应焊 (1928 年, 美国)、冷压焊 (1948 年, 英国)、高频电阻焊 (1951 年, 美国)、超声波焊 (1956 年, 美国)、摩擦焊 (1957 年, 前苏联)、旋弧焊 (1959 年)、爆炸焊 (1963 年, 美国), 以及其后的扩散焊、磁力脉冲焊、冰压焊和水击焊等。

应该指出, 随着经济进步和社会发展, 新材料、新产品不断涌现, 一些压焊方法逐渐退出了焊接领域, 如锻焊、冰压焊、水击焊、旋弧焊等, 而一些新方法又萌生并迅速发展起来。

搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, FSW) 是英国焊接研究所 (TWI, UK) 1991 年发明的一种新型摩擦焊技术, 其原理是利用一种非耗损的特殊搅拌头在待焊界面处搅拌摩擦形成可靠连接, 如图 2-1-3 所示。FSW 被公认为是 21 世纪最具革命性、突破性的连接新技术。

众所周知, 焊接科学技术几乎利用了世界上已知的所有热源, 同时也在努力寻找提供焊接热源的新方法及更有效、更充分利用热源的方法。20 世纪中期, 焊接工作者尝试将各种热源混合应用于同一焊接过程, 并在熔焊领域获得成功, 其中主要是激光-电弧复合, 产生了 LB-TIG、LB-MIG、LB-PAW 等复合焊接工艺。在压焊领域里也有激光辅助搅拌摩擦焊 (LB-FSW) 和激光-高频焊 (LB-HFRW) 等复合焊接工艺。

LB-FSW (2002 年发明) 是为了克服 FSW 时对工件夹紧压力和搅拌头转轴的能量需求都比较大且严格的缺点。其原理是预先在转轴工作前方用能量为 700W 的多模 N_d : YAG 激光束对待焊工件进行预热 (图 2-1-4), 通过激光在转轴之前对材料的加热、软化, 焊接时焊件摩擦生热所需的压紧力即可大大减小, 移动旋转轴的动力也可以大大减小, 并且这种工艺的组合可以大大降低焊接工具 (搅拌头) 自身的损耗。

LB-HFRW 是在高频焊管的同时, 采用激光束对尖劈 (汇合点) 进行加热 (图 2-1-5), 从而使尖劈在整个厚度方向上加热更均匀, 这有利于进一步提高焊管的生产率和质量。

目前, 压焊设备发展很快, 计算机控制的机电一体化高精产品在市场上很容易购置, 这就为压焊技术在工业中的应用创造了良好条件, 图 2-1-6 为用于电阻点焊的国产焊接机器人 (沈阳新松机器人自动化股份有限公司生产), 图 2-1-7 为用于扩散焊的美国真空工业公司生产的 Centorr 6-1650-15T 真空热压炉。

同时, 由大量焊接机器人 (以点焊机器人为主) 和计算机控制的自动化焊装设备构成的焊装

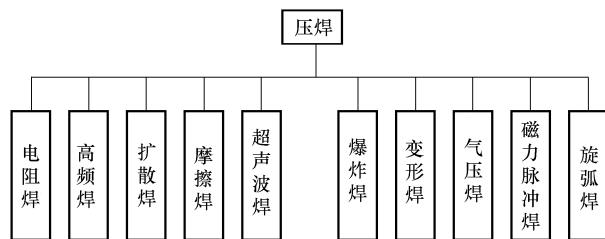


图 2-1-2 压焊的分类

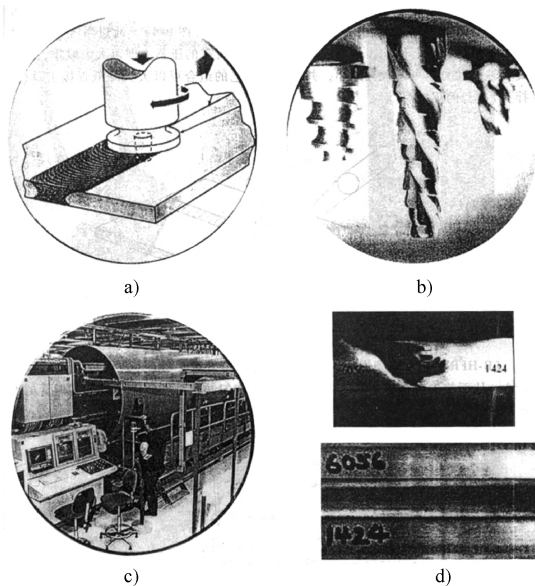


图 2-1-3 搅拌摩擦焊原理及应用

a) 原理 b) 搅拌头 c) 生产现场
d) AA6056/AA1424 FSW 接头

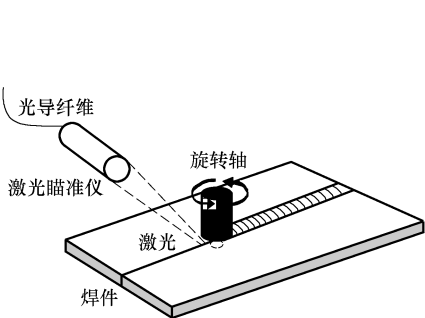


图 2-1-4 LB-FSW 原理

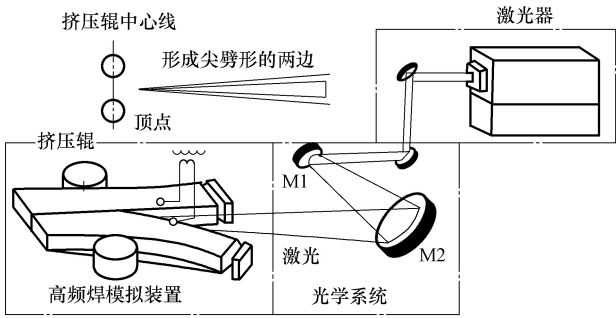
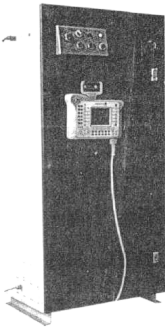


图 2-1-5 LB-HFRW 示意图



a)



b)

图 2-1-6 RD120 点焊机器人（未安装点焊钳）
a) 机器人本体 b) 机器人控制器（SIASUN-GRC）

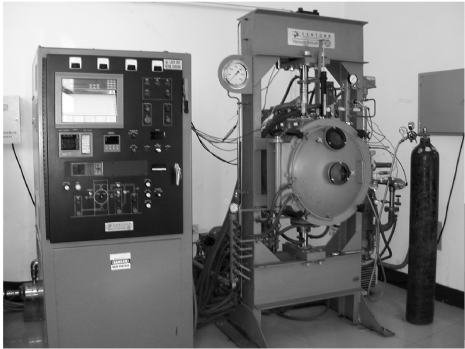


图 2-1-7 Centrorr6-1650-15T 真空热压炉

生产线（图 2-1-8）代表了汽车车身制造技术的最高水平，可实现生产方式的多品种、大批量混流生产，人们所期望的无人化车间、无人化工厂的时代即将到来。

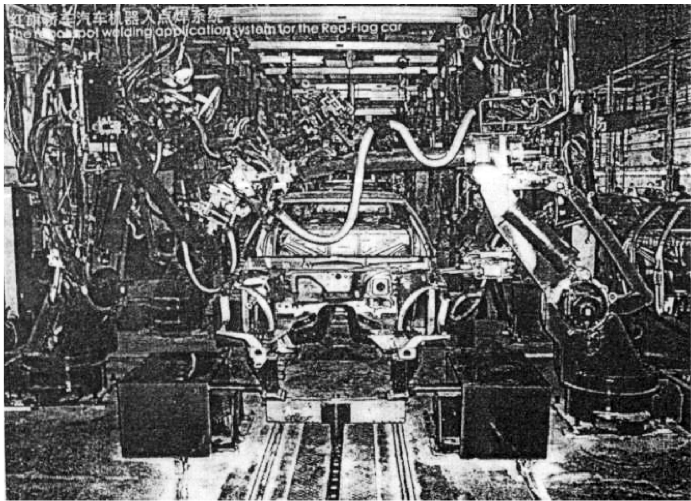


图 2-1-8 红旗轿车车身焊装生产线

参考文献

- [1] 赵熹华. 焊接方法与机电一体化 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 赵熹华, 冯吉才. 压焊方法及设备 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册: 第1卷 焊接方法及设备 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [4] 中国机械工程学会, 中国材料研究学会. 中国材料工程大典: 第22卷 材料焊接工程 (上) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [5] 王敏. 材料成形设备及自动化 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.

第2章 电 阻 焊

电阻焊（Resistance Welding, RW）是工件组合后通过电极施加压力，利用电流通过接头的接触面及邻近区域产生的电阻热进行焊接的方法，属压焊。

电阻焊过程的物理本质是利用焊接区本身的电阻热和大量塑性变形能量，使两个分离表面的金属原子之间接近到晶格距离形成金属键，在结合面上产生足够量的共同晶粒而得到焊点、焊缝或对接接头。电阻焊是一种焊接质量稳定、生产效率且易于实现机械化、自动化的连接方法，广泛应用于汽车、航空航天、电子、家用电器等领域。据统计，电阻焊方法已占整个焊接工作量的1/4左右，并有继续增加的趋势。

电阻焊方法主要有点焊、凸焊、缝焊、对焊、高频对接缝焊（又称高频焊），其方法原理如图2-2-1所示；完成各方法所用主要电阻焊设备各类焊接电源的输出电流波形如图2-2-2所示。按焊件的接头形式、工艺方法和采用电源种类不同，电阻焊可分为多种具体形式，见表2-2-1。

本章主要介绍电阻焊中广为应用的点焊和闪光对焊，适当介绍凸焊、缝焊及电阻对焊，高频焊在5.1节中另做详细介绍。

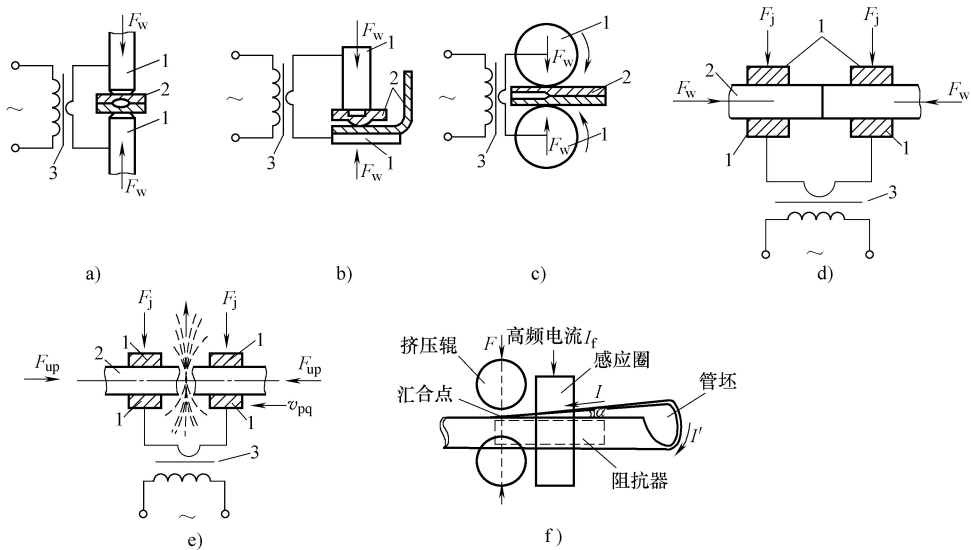


图2-2-1 电阻焊方法原理示意图

a) 点焊 b) 凸焊 c) 缝焊 d) 电阻对焊 e) 闪光对焊 f) 高频对接缝焊（图示为高频感应焊）
1—电极 2—焊件 3—阻焊变压器

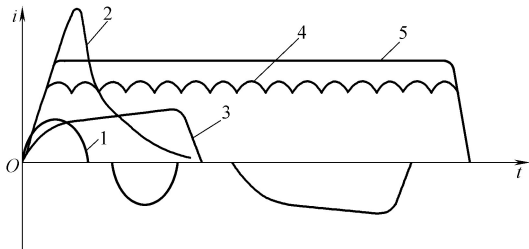


图2-2-2 电阻焊设备各类焊接电源的输出电流波形图

1—工频交流 2—电容放电 3—低频式 4—二次整流 5—逆变式

表 2-2-1 电阻焊分类

电源种类		接头形式			工艺方法		
		搭接			对接		
		点焊	凸焊	缝焊 ^③	对焊		对接缝焊
					电阻对焊	闪光对焊	
阻焊变压器 一次交变馈电	工频(50 或 60Hz)	●	●	●	●	●	●
	中频(100 ~ 600Hz)			●		● ^①	
	高频(100 ~ 500kHz)						●
	低频(3 ~ 10Hz)	●	●	●		●	
	二次整流(50 或 60Hz)	●	●	●	●	●	
	逆变式(600 ~ 4000Hz)	●	●	●	●	●	
阻焊变压器一 次单向馈电	电容放电	●	●	●	●	● ^②	
	直流冲击波	●		●			

注：● 表示采用。
① 指矩形波闪光对焊；②指冲击闪光焊；③指含其中对接形式垫箔缝焊。

2.1 点焊

电阻点焊（Resistance Spot Welding, RSW）简称点焊，是焊件装配成搭接接头并压紧在两电极之间，利用电阻热熔化母材金属，形成焊点的电阻焊方法。

点焊是一种高速、经济的重要连接方法，适用于制造可以采用搭接、接头不要求气密、厚度小于3mm的冲压、轧制的薄板构件。当然，它也可焊接厚度达6mm的或更厚的金属构件，但这时其综合技术经济指标将不如某些熔焊方法。

2.1.1 点焊的基本原理

点焊接头是在热-机械（力）联合作用下形成的。点焊时的加热是建立焊接温度场，促进焊接区塑性变形和获得优质连接的基本条件。

1. 点焊的热源

点焊的热源是电阻热，即当焊接电流通过两电极间的金属区域时，由于焊接区具有电阻（见图2-2-3）会析热（电流的热效应），并在焊件内部形成热源。

根据焦耳定律，焊接区的总析出热量 Q 为

$$Q = \int_0^t i^2 (r_c + 2r_{ew} + 2r_w) dt \tag{2-2-1}$$

式中 i ——焊接电流的瞬时值，是时间的函数；

r_c ——焊件间接触电阻的动态电阻值，是时间的函数；

$2r_{ew}$ ——电极与焊件间接触电阻的动态电阻值，是时间的函数；

$2r_w$ ——焊件内部电阻的动态电阻值，是时间的函数；

t ——通过焊接电流的时间。

研究表明，不同的金属材料在加热过程中电阻 r 的变化规律相差甚大（见图2-2-4）。不锈钢、钛合金等材料呈单调下降的特性；铝及铝合金在加热初期呈迅速下降后趋于稳定；而低碳钢 r 的变化曲线上却明显有一峰值。由于动态总电阻 r 标志着焊接区加热的熔核长大的特征，可用来作为监控焊点质量的物理参数。例如，低碳钢点焊质量监控中的“动态电阻法”。

点焊热平衡组成如图2-2-5所示。热平衡方程式如下：

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \tag{2-2-2}$$

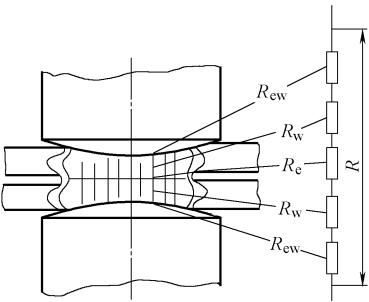


图 2-2-3 点焊接区示意图和等效电路图

式中 Q ——焊接区总析出热量；

Q_1 ——熔化母材金属形成熔核的热量；

Q_2 ——通过电极热传导而损失的热量；

Q_3 ——通过焊件热传导而损失的热量；

Q_4 ——通过对流、辐射散失到空气介质中的热量。

Q 的大小取决于焊接参数特征和金属的热物理性质。例如，点焊 2A12-T4 (LY12CZ) 铝合金板材，获得直径 6mm 熔核时，硬规范 ($t = 0.02\text{s}$) 时 $Q = 400\text{J}$ ；软规范 ($t = 0.2\text{s}$) 时 $Q = 1200\text{J}$ ；而点焊钢材时，同样获得 6mm 熔核，则 $Q = 1700\text{J}$ ； Q_1 仅取决于金属的热物理性质及熔化金属量，而与热源种类和焊接参数特征无关，点焊时 $Q_1 \approx (10\% \sim 30\%) Q$ ，导热性好的金属材料（铝、铜合金等）取低限； Q_2 与电极材料、形状及冷却条件有关，点焊时 $Q_2 \approx (30\% \sim 50\%) Q$ ，是最主要的散热损失； Q_3 与板件厚度、材料的热物理性质以及焊接参数特征等因素有关， $Q_3 \approx 20\% Q$ ； $Q_4 \approx 5\% Q$ ，在利用热平衡方程式进行有关计算时可忽略不计。

应该指出，实际生产中往往利用控制 Q_2 来获得合适的焊接温度场。例如，在不同厚度焊件的点焊中，采用附加垫片或改换电极材料等措施以减小 Q_2 ，可改善熔核偏移，增加薄件一边的焊透率。

焊接区的温度分布是析热与散热的综合结果，点焊加热终了时的温度分布如图 2-2-6 所示。最高温度总是处于焊接区中心，超过被焊金属熔点 T_m 的部分形成熔核，核内温度可能超过 T_m （焊钢时超出 $200 \sim 300\text{K}$ ），但在电磁力强烈搅拌下，进一步升高是困难的。由于 Q_2 、 Q_3 的强烈作用，离开熔核边界温度降低很快。当被焊金属导热性差（钢）或用硬规范点焊时，温度梯度将很大；而被焊金属导热性好（铝）或用软规范点焊时，温度梯度则将较小。

2. 点焊接头的形成

点焊的原理和接头形成如图 2-2-1a 所示。将焊件 2 压紧在两电极 1 之间，施加电极压力后，阻焊变压器 3 向焊接区输入强大的焊接电流，在焊件接触面（贴合面）上形成真实的物理接触点，并随着通电加热的进行而不断扩大。塑变能与热能使接触点的原子不断激活，接触面消失，继续加热形成熔化核心，简称熔核。加热停止后，核心液态金属以自由能最低的熔核边界半熔化晶粒表面为晶核开始冷却结晶，沿与散热相反的方向不断以柱状枝晶形式向中间延伸、生长，直至枝晶相互抵住，获得牢固的金属键，接合面消失，得到柱状晶生长较充分的焊点，如图 2-2-7 所示。同时，点焊过程中液态熔核周围的高温固态金属，在电极压力作用下产生塑性变形和强烈的再结晶而形成塑性环。它的存在有助于接头承受载荷和防止周围气体侵入并保证熔核液态金属不至于沿板缝向外喷溅。

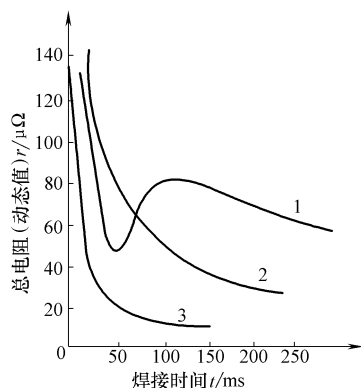


图 2-2-4 典型材料的动态电阻比较
1—低碳钢 2—不锈钢 3—铝及铝合金

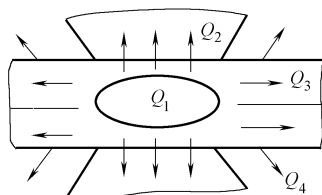


图 2-2-5 点焊热平衡组成

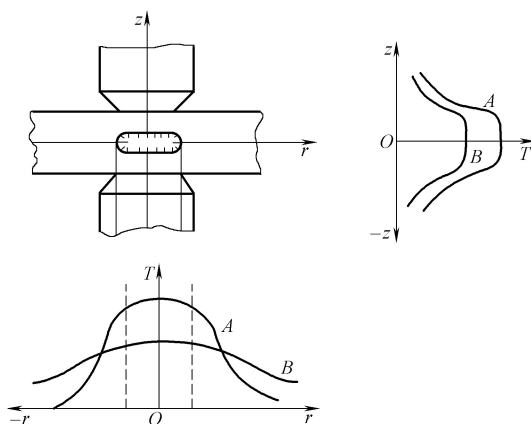


图 2-2-6 点焊加热终了时的温度分布

A—焊钢时 B—焊铝时

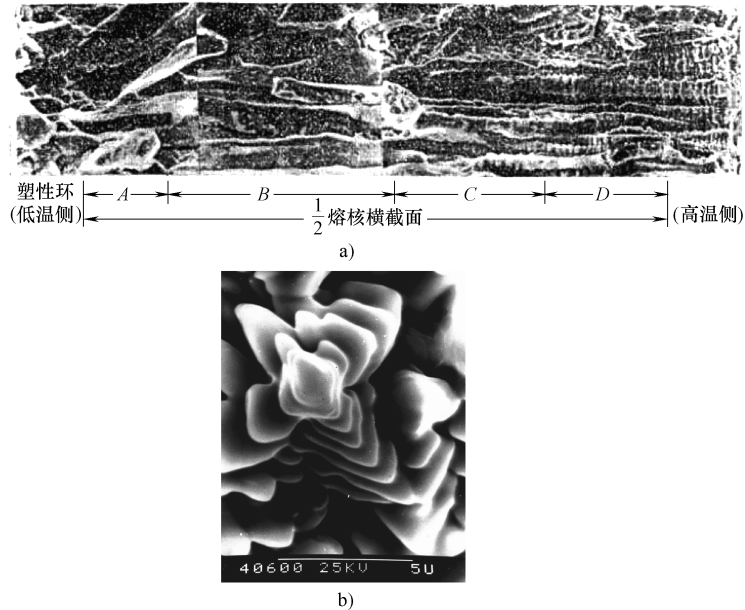


图 2-2-7 熔核横断面某部位 SEM 像 (65Mn)

a) 1/2 熔核横断面局部 b) 柱状枝晶形貌俯视图

以 65Mn 熔核为例, 其形成过程模型如图 2-2-8 所示。图 2-2-8a 表示凝固前, 在熔合线上 (固—液相界面) 有许多晶粒处于半熔化状态, 显然熔核的液态金属能很好地润湿取向不同的半熔化晶粒表面, 为异质成核结晶提供了有利条件。图 2-2-8b 表示液态熔核的温度降低时, 由于成分过冷较大, 以半熔化晶粒作底面沿 $\langle 100 \rangle$ 向长出枝晶束。

在电极与母材的急冷作用下, 凝固界面前形成较大的温度梯度, 因而使枝晶主干伸入液体中较远, 枝晶生长很快, 枝晶臂间距 H 与冷却速度 V 间存在以下关系:

$$\text{一次枝晶臂间距 } H_1 \propto V^{-\frac{1}{2}} \quad (2-2-3)$$

$$\text{二次枝晶臂间距 } H_2 \propto V^{-(\frac{1}{2}+\frac{1}{3})} \quad (2-2-4)$$

由于薄件脉冲点焊熔核尺寸小, 电极与母材的急冷作用强, 液体金属的冷却速度极快, 因此枝晶臂的间距甚小。

图 2-2-8c 表示枝晶继续生长、凝固层向前推进, 液体向枝晶间充填。

枝晶间的液体逐渐向枝晶上凝固, 使枝晶变长变粗, 靠近母材处由于温度低, 液体向枝晶上凝固快, 以至形成连续的凝固层, 由于 65Mn 合金具有一定的凝固温度范围, 故凝固层呈锯齿形状, 由于晶界在凝固层内形成, 这就造成柱状晶 A 段表面平坦的形貌。

越向熔核内部, 温度梯度越小, 液体向枝晶上凝固越少, 使向前推进的凝固层界面起伏更大。倾斜生长的枝晶束被与最大温度梯度一致的枝晶束 (这类枝晶束生长较快) 所阻碍而半途停止。当一次枝晶臂间距过大时, 则从二次枝晶臂上可以长出三次臂, 这个三次臂可赶上一次臂而成为其

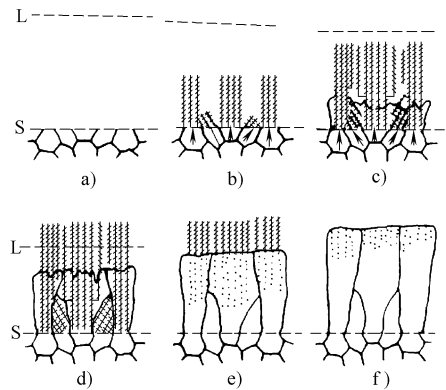


图 2-2-8 柱状组织形成过程模型

L—液态金属表面 (1/2 熔核高处)

S—母材固相表面 (熔合线处)

↑—晶体生长方向 $\langle 100 \rangle$

中的一个。液体金属凝固时产生的体积收缩和毛细现象，均引起熔核内液态金属向正在凝固的枝晶间填充。

图 2-2-8d 表示凝固即将结束、剩余液体金属不足以完全充填枝晶间隙，未被液体充满的枝晶将暴露在前沿，而枝晶间将留下空隙，这些空隙将成为缩松。

图 2-2-8e 表示具有缩松缺陷的熔核柱状组织示意图，断口形貌如图 2-2-7a 所示。

图 2-2-8f 表示优质接头的熔核柱状组织示意图，断口形貌如图 2-2-9 所示。

由于材质和焊接参数特征不同，熔核的凝固组织可有三种：柱状组织、等轴组织、“柱状 + 等轴”组织。

纯金属（如镍、钨等）和结晶温度区间窄的合金（如低碳钢、钛合金等），其熔核为柱状组织；铝合金和镁合金等其熔核为“柱状 + 等轴”组织，熔核凝固组织完全是等轴组织的情况较为罕见。

2.1.2 点焊的一般工艺

1. 点焊方法

根据点焊时电极向焊接区馈电方式，点焊分为双面点焊和单面点焊。同时，又根据在同一个点焊焊接循环中所能形成的焊点数，将其进一步细分，如图 2-2-10 和图 2-2-11 所示。

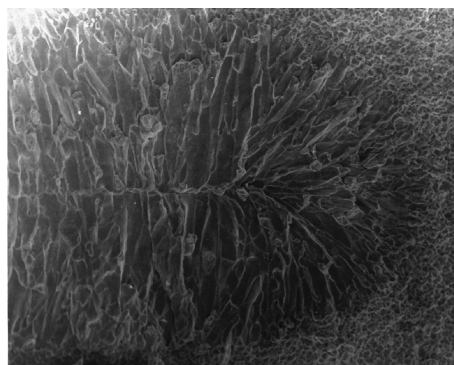


图 2-2-9 优质接头 1/2 熔核横断面 SEM 像 (65Mn)

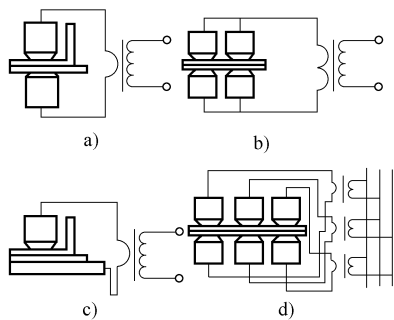


图 2-2-10 不同形式的双面点焊

a) 双面单点焊 b) 双面双点焊
c) 小（无）压痕双面单点焊 d) 双面多点焊

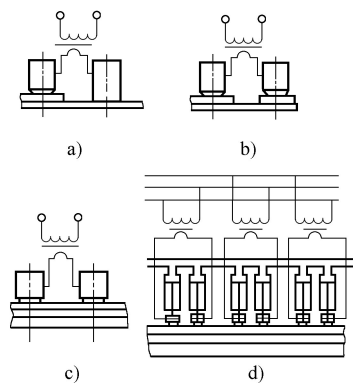


图 2-2-11 不同形式的单面点焊

a) 单面单点焊 b) 无分流单面双点焊
c) 有分流单面双点焊 d) 单面多点焊

双面点焊应用最广，尤其图 2-2-10a 是最常用的方式；图 2-2-10c 常用于装饰性面板点焊，装饰面因处于大面积的导电板电极一侧，会得到压痕或无压痕的焊点；图 2-2-10d 因采用多个变压器单独双面馈电，其点焊质量显著优于图 2-2-10b；单面点焊时，电极由工件的同一侧向焊接处馈电，仅用于下电极无法抵达构件背面或内部的场合。其中图 2-2-11a 常用于零件较大、二次回路过长情况；图 2-2-11b 因无分流产生而优于图 2-2-11c，为降低分流可在工件下面附设铜垫板，以提供低电阻通路；图 2-2-11d 各对电极均由单独变压器供电，可同时通电，具有焊接质量高、生产率高、变形小和三相负载平衡等优点，在汽车组件生产中常可遇到。

总之，对焊件馈电点焊时应遵循以下原则：尽量缩短二次回路长度及减小回路所包围的空间面

积，以减少能耗；尽量减少伸入二次回路的铁磁体体积，特别是在不同位置焊点焊接时伸入体积有很大变化，以避免焊接电流产生较大波动（尤其使用工频交流焊机）；尽量防止和减小分流。

2. 点焊接头设计

(1) 点焊接头主要尺寸的确定 点焊通常采用搭接接头或折边接头（见图 2-2-12），接头可以由两个或两个以上等厚度或不等厚度、相同材料或不同材料的零件组成，焊点数量可为单点或多点。在电极可达性良好的条件下，接头主要尺寸设计可参见表 2-2-2 ~ 表 2-2-4。

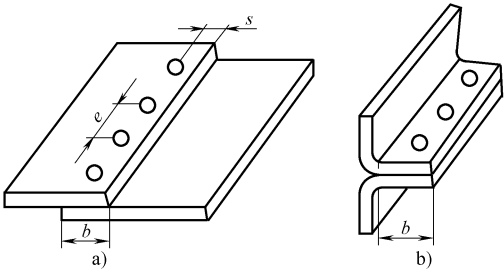


图 2-2-12 点焊接头形式
a) 搭接接头 b) 折边接头

表 2-2-2 点焊接头尺寸的大致确定

序号	经验公式	简 图	备 注
1	$d = 2\delta + 3$ 或 $d = 5\sqrt{\delta}$		d——熔核直径 (mm)
2	$A = 30 \sim 70$		A——焊透率 (%)
3	$c' \leq 0.2\delta$		c'——压痕深度 (mm)
4	$e > 8\delta$		e——点距 (mm)
5	$s > 6\delta$		s——边距 (mm)
			δ——薄件厚度 (mm)
			n——焊点数
			O——点焊缝符号
			$dO n \times (e)$ ——点焊缝标注

注：1. 搭边量 $b = 2s$ 。
2. 焊透率 $A = h/\delta \times 100\%$ 。

表 2-2-3 接头的最小搭接量 (单位：mm)

最薄板件厚度	单排焊点的最小搭接量			双排焊点的最小搭接量		
	结构钢	不锈钢及高温合金	轻合金	结构钢	不锈钢及高温合金	轻合金
0.5	8	6	12	16	14	22
0.8	9	7	12	18	16	22
1.0	10	8	14	20	18	24
1.2	11	9	14	22	20	26
1.5	12	10	16	24	22	30
2.0	14	12	20	28	26	34
2.5	16	14	24	32	30	40
3.0	18	16	26	36	34	46

表 2-2-4 焊点的最小间距 (单位：mm)

最薄板件厚度	最小间距			最薄板件厚度	最小间距		
	结构钢	不锈钢及高温合金	轻合金		结构钢	不锈钢及高温合金	轻合金
0.5	10	8	15	1.5	14	12	20
0.8	12	10	15	2.0	16	14	25
1.0	12	10	15	2.5	18	16	25
1.2	14	12	15	3.0	20	18	30

(2) 焊点布置的合理性 点焊焊接结构通常由多点连接而成，其排列形式多为单排，有时也可为多排。在单排点焊接头中焊点除受切应力外，还承受由偏心力引起的拉应力，在多排点焊的接头中，拉应力较小。研究表明，焊点排数多于 3 是不合理的，因为多于 3 排并不能再增加承载能力。同时，还应注意，单排的点焊接头是不可能达到接头与母材等强度，只有采用多排（3 排）布置焊点，才可以改善偏心力矩的影响，降低应力集中系数，如果采用交错的排法，情况将会更好。从理论上来说，可以得到与基本金属等强度的点焊接头。

应当注意，点焊接头的疲劳强度很低，增加焊点数量也无效。
点焊接头静载强度的计算方法及焊点布置见表 2-2-5。

表 2-2-5 点焊接头静载强度的计算方法及焊点布置

	拉或压： 单面剪切：$\tau = \frac{4P}{ni\pi d^2} \leq \tau'_{op}$ 双面剪切：$\tau = \frac{2P}{ni\pi d^2} \leq \tau'_{op}$ τ'_{op} —— 焊点的剪切许用应力 i —— 焊点的列数 n —— 每列的焊点数		弯： 单面剪切： $\tau_{\max} = \frac{4My_{\max}}{i\pi d^2 \sum y^2 i} \leq \tau'_{op}$ 双面剪切： $\tau_{\max} = \frac{2My_{\max}}{i\pi d^2 \sum y^2 i} \leq \tau'_{op}$
焊点布置	焊点直径 d 见表 2-2-2 或 $d = 5\sqrt{\delta}$, δ 为被焊板中较薄者 点距 $e \geq 3d$, 边距 $e_1 \geq 2d, e_2 \geq 1.5d$		偏心力：$\tau_M = \frac{4PLy_{\max}}{i\pi d^2 \sum y^2 i}$ 或 $\tau_M = \frac{2PLy_{\max}}{i\pi d^2 \sum y^2 i}$ (单面剪切) (双面剪切) $\tau_Q = \frac{4P}{ni\pi d^2}$ (单面剪切) 或 $\tau_Q = \frac{2P}{ni\pi d^2}$ (双面剪切) $\tau_R = \sqrt{\tau_M^2 + \tau_Q^2} \leq \tau'_{op}$

通常焊点强度用每点切力 (F_τ) 及正拉力 (F_σ) 评定，正拉力与切力之比 (F_σ/F_τ) 称为塑 (延) 性比，其值越大，表明塑 (延) 性越好，而且与材质关系密切。例如钢焊件一般随含碳量增加而塑性比下降，应按结构受力及所用材料合理选用塑 (延) 性比。

(3) 点焊结构的影响 电极能否较方便地达到焊接位置，对焊接质量和生产效率影响很大。因此，根据电极可达性将点焊结构分为敞开式 (上、下均方便可达)、半敞开式 (仅上或下可方便到达)、封闭式 (上或下均受到阻碍)，这时需采用专用电极或专用电极握杆，如图 2-2-13 所示。

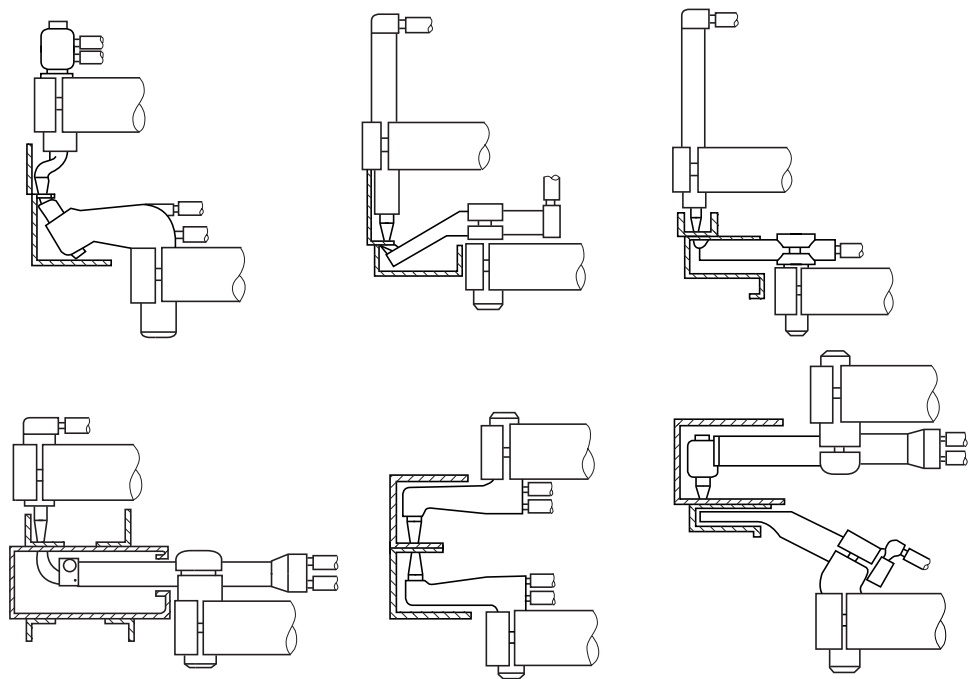


图 2-2-13 专用电极和专用电极握杆

3. 焊前工件表面清理

点焊、凸焊和缝焊前,均需对焊件表面进行清理,以除掉表面脏物与氧化膜,获得小而均匀一致的接触电阻,这是避免电极粘结、飞溅、保证点焊质量和高生产率的主要前提。对于重要焊接结构和铝合金焊件等,尚需每批抽测施加一定电极压力下的两电极间总电阻 R ,以评定清理效果,一般情况下可由清理工艺保证。清理方法有机械清理法和化学清理法两类:机械清理法主要有喷砂、刷光、抛光及磨光等;化学清理法中常用的溶液成分见表 2-2-6,也可查阅相关熔焊资料。

表 2-2-6 化学清理法常用的溶液成分

金属	腐蚀用溶液	中和用溶液	R 允许值/ $\mu\Omega$
低碳钢	1. 每升水中 H_2SO_4 200g、NaCl 10g、缓冲剂六次甲基四胺 1g,温度 50 ~ 60℃ 2. 每升水中 HCl 200g、六次甲基四胺 10g,温度 30 ~ 40℃	每升水中 NaOH 或 KOH 50 ~ 70g,温度 20 ~ 25℃	600
结构钢、低合金钢	1. 每升水中 H_2SO_4 100g、HCl 50g、六次甲基四胺 10g,温度 50 ~ 60℃ 2. 每 0.8L 水中 H_3PO_4 65 ~ 98g、 Na_3PO_4 35 ~ 50g 乳化剂 OP25g、硫脲 5g	每升水中 NaOH 或 KOH 50 ~ 70g,温度 20 ~ 25℃ 每升水中 $NaNO_3$ 5g,温度 50 ~ 60℃	800
不锈钢、高温合金	在 0.75L 水中 H_2SO_4 110g、HCl 130g、 HNO_3 10g,温度 50 ~ 70℃	质量分数为 10% 的苏打溶液,温度 20 ~ 25℃	1000
钛合金	每 0.6L 水中 HCl 16g、 HNO_3 70g、HF 50g	—	1500
铝合金	每升水中 H_3PO_4 110 ~ 155g、 $K_2Cr_2O_7$ 或 $Na_2Cr_2O_7$ 1.5 ~ 0.8g,温度 30 ~ 50℃	每升水中 HNO_3 15 ~ 25g,温度 20 ~ 25℃	80 ~ 120
镁合金	在 0.3 ~ 0.5L 水中 NaOH 300 ~ 600g、 $NaNO_3$ 40 ~ 70g、 $NaNO_2$ 150 ~ 250g,温度 70 ~ 100℃	—	120 ~ 180

注:成分中酸的密度。硫酸—1.84 (单位为 g/cm^3 ,下同),硝酸—1.40,盐酸—1.19,正磷酸—1.6。

焊前点焊电极的正确选用和焊接过程中的维护修理,也是一个重要条件,可参阅 2.5.3 节的相关内容。

4. 点焊焊接参数及其相互关系

(1) 点焊焊接循环 焊接循环 (Welding Cycle),在电阻焊中是指完成一个焊点(缝)所包括的全部程序。如图 2-2-14 所示,一个较完整的复杂点焊焊接循环,由加压、…、休止等十个程序段组成, I 、 F 、 t 中各参数均可独立调节,它可满足常用(含焊接性较差的)金属材料的点焊工艺要求。当将 I 、 F 、 t 中某些参数设为零时,该焊接循环将会被简化以适应某些特定材料的点焊要求,而当其中 I_1 、 I_3 、 F_{pr} 、 F_{t0} 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_6 、 t_7 、 t_8 均为零时,就得到由四个程序段组成的基本点焊焊接循环。该循环是目前应用最广的点焊循环,即所谓“加压—焊接—维持—休止”的四程序段点焊或电极压力不变的单脉冲点焊。

(2) 点焊焊接参数 点焊焊接参数的选择主要取决于金属材料的性质、板厚、结构形式及所用设备的特点(能提供的焊接电流波形和压力曲线),工频交流点焊在点焊中应用最广,且主要采用电极压力不变的单脉冲点焊。

1) 焊接电流 I : 焊接时流经焊接回路的电流称为焊接电流,一般在数万安培(A)以内。焊接电流是最主要的点焊焊接参数。调节焊接电流对接头力学性能的影响如图 2-2-15 所示。

AB 段曲线呈陡峭段,由于焊接电流小使热源强度不足而不能形成熔核或熔核尺寸甚小,因此焊点拉剪载荷较低且很不稳定。

BC 段曲线平稳上升,随着焊接电流的增加,内部热源发热量急剧增大($Q \propto I^2$),熔核尺寸稳定增大,因而焊点拉剪载荷不断提高;临近 C 点区域,由于板间翘离限制了熔核直径的扩大和温度场进入准稳态,因而焊点拉剪载荷变化不大。

CD 段由于电流过大使加热过于强烈,引起金属过热、飞溅、压痕过深等缺陷,接头性能反而降低。

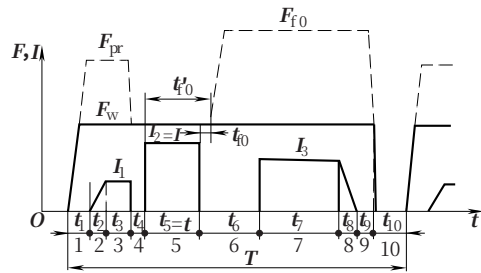


图 2-2-14 复杂点焊焊接循环示意图

- 1—加压程序 2—热量递增程序 3—加热 1 程序
4—冷却 1 程序 5—加热 2 程序 6—冷却 2 程序
7—加热 3 程序 8—热量递减程序
9—维持程序 10—休止程序
 F_{pr} —预压压力 F_0 —锻压力
 t_0 —施加锻压力时刻 (从断电时刻算起)
 F_w —电极压力 T —点焊周期
 t'_0 —施加锻压力时刻 (从通电时刻算起)

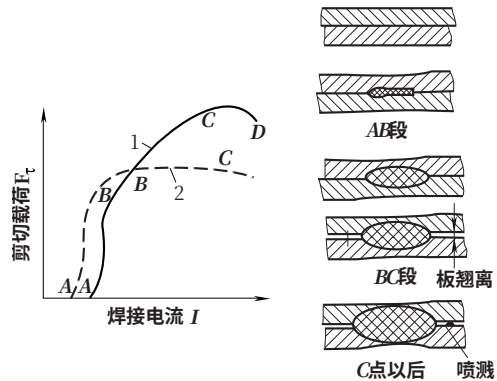


图 2-2-15 接头拉剪载荷与焊接电流的一般关系
1—板厚 1.6mm 以上 2—板厚 1.6mm 以下

图 2-2-15 还表明，焊件越厚，BC 段越陡峭，即焊接电流的变化对焊点拉剪载荷的影响越敏感。

2) 焊接时间 t ：自焊接电流接通到停止的持续时间，称焊接通电时间，简称焊接时间。点焊时 t 一般在数十周波 (1 周波 = 0.02s) 以内。焊接时间对接头力学性能的影响与焊接电流相似 (见图 2-2-16)。但应注意两点：

① C 点以后曲线并不立即下降，这是因为尽管熔核尺寸已达饱和，但塑性环还可有一定扩大，再加之热源加热速率较和缓，因而一般不会产生喷溅。

② 焊接时间对接头塑性指标影响较大，尤其对承受动载荷或有脆性倾向的材料 (可淬硬钢、铝合金等)，较长的焊接时间将产生较大的不良影响。

3) 电极压力 F_w ：点焊时通过电极施加在焊件上的压力一般要达数千牛 (kN)。如图 2-2-17 所

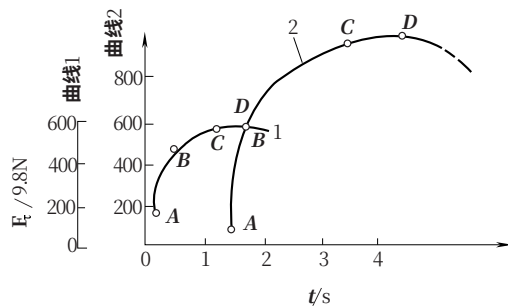


图 2-2-16 接头拉剪载荷与焊接时间的关系
1—板厚 1mm 2—板厚 5mm

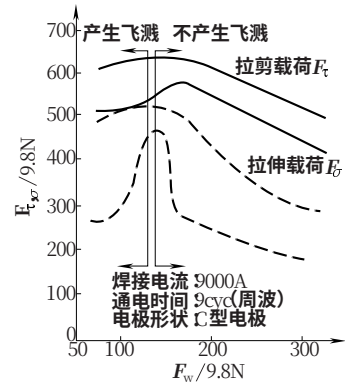


图 2-2-17 接头承载能力与电极压力关系 (低碳钢, $\delta = 1\text{mm}$)

F_w —电极压力 F_t —拉剪载荷 F_s —拉伸载荷

示,电极压力过大或过小都会使焊点承载能力降低和分散性变大,尤其对拉伸载荷影响更甚。当电极压力过小时,由于焊接区金属的塑性变形范围及变形程度不足,造成因电流密度过大而引起加热速度增大而塑性环又来不及扩展,从而产生严重喷溅。这不仅使熔核形状和尺寸发生变化,而且污染环境和不安全,这是绝对不允许的。电极压力过大时将使焊接区接触面积增大,总电阻和电流密度均减小,焊接散热增加,因此熔核尺寸下降,严重时会出现未焊透缺陷。一般认为,在增大电极压力的同时,适当加大焊接电流或焊接时间,以维持焊接区加热程度不变。同时,由于压力增大,可消除焊件装配间隙、刚度不均匀等因素引起的焊接区所受压力波动对焊点强度的不良影响。此时不仅使焊点强度维持不变,稳定性也可大为提高。

4) 电极头端面尺寸 D 或 R : 电极头是指点焊时与焊件表面相接触时的电极端头部分。其中 D 为锥台形电极头端面直径, R 为球形电极头球面半径, h 为端面与水冷端距离(见图 2-2-18)。电极头端面尺寸增大时,由于接触面积增大、电流密度减小、散热效果增强,均使焊接区加热程度减弱,因而熔核尺寸减小,使焊点承载能力降低(见图 2-2-19)。应该指出,点焊过程中,由于电极工作条件恶劣,电极头产生压溃变形和粘损是不可避免的,因此要规定:锥台形电极头端面尺寸的增大 $\Delta D < 15\% D$,同时对由于不断锉修电极头而带来的与水冷端距离 h 的减小也要给予控制。低碳钢点焊 $h \geq 3\text{mm}$, 铝合金点焊 $h \geq 4\text{mm}$ 。

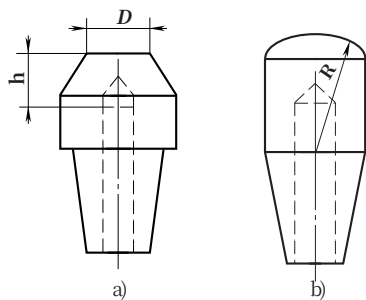


图 2-2-18 常用电极头结构

a) 锥台形电极头 b) 球形电极头

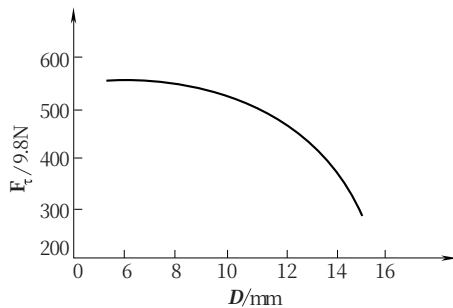


图 2-2-19 接头拉剪载荷 F_t 与电极头端面直径 D 的关系

(低碳钢 $\delta = 1\text{mm}$; 用图 2-2-16 接近 C 点的焊接参数焊接)

(3) 焊接参数间的相互关系及选择 点焊时,各焊接参数的影响是相互制约的。当电极材料、端面形状和尺寸选定以后,焊接参数的选择主要是考虑焊接电流、焊接时间及电极压力,这是形成点焊接头的三大要素,其相互配合可有两种方式。

1) 焊接电流和焊接时间的适当配合: 这种配合是以反映焊接区加热速度的快慢为主要特征。当采用大焊接电流、小焊接时间参数时,称为硬规范;而采用小焊接电流、适当长焊接时间参数时,称为软规范。

软规范的特点是加热平稳,焊接质量对焊接参数波动的敏感性低,焊点强度稳定;温度场分布平缓,塑性区宽,在压力作用下易变形,可减少熔核内的喷溅、缩孔和裂纹倾向;对有淬硬倾向的材料,软规范可减小接头冷裂纹倾向;所用设备装机容量小,控制精度不高,因而较便宜。但是,软规范易造成焊点压痕深,接头变形大,表面质量差,电极磨损快,生产效率低,能量损耗较大。

硬规范的特点与软规范基本相反。在一般情况下,硬规范适用于铝合金、奥氏体不锈钢、低碳钢及不等厚度板材的焊接;而软规范较适用于低合金钢、可淬硬钢、耐热合金、钛合金等的焊接。

应该注意,调节 I 、 t 使之配合成不同的硬、软规范时,必须相应地改变电极压力 F_w ,以适应不同加热速度及不同塑性变形能力的要求。硬规范焊接时所用电极压力显著大于软规范焊接时的电极压力。

2) 焊接电流和电极压力的适当配合: 这种配合是以焊接过程中不产生喷溅为主要原则,这是

目前国外几种常用电阻点焊规范（RWMA、MIL Spec、BWRA 等）的制定依据。根据这一原则制定的 I 、 F_w 关系曲线，称为喷溅临界曲线（见图 2-2-20）。曲线左半区为无喷溅区，这里 F_w 大而 I 小，但焊接压力选择过大会造成固相焊接（塑性环）范围过宽，导致焊接质量不稳定。曲线右半区为喷溅区，因为电极压力不足，加热速度过快而引起喷溅，使接头质量严重下降和不能安全生产。

当将规范选在喷溅临界曲线附近（无喷溅区内）时，可获得最大熔核和最高拉伸载荷。同时，由于降低了焊机机械功率，也提高了经济效果。当然，在实际应用这一原则时，应将电网电压、加压系统等的允许波动带来的影响考虑在内。

以上讨论的两种情况，其结果常以金属材料点焊焊接参数表、列线图、曲线图和规范尺等形式表现出来，但在实际使用这些资料时均需进行试验修正。

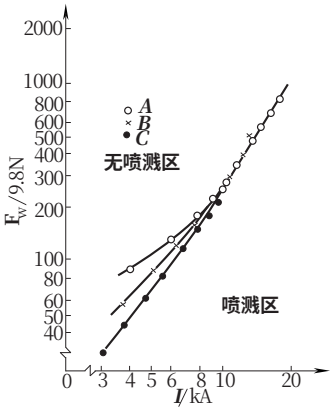


图 2-2-20 焊接电流与电极压力的关系
(A、B、C 为 RWMA 焊接规范中的三类)

2.1.3 常用材料及新材料的点焊

1. 材料的点焊焊接性分析

判断金属材料点焊焊接性的主要标志有以下方面：

- 1) 材料的导电性和导热性，即电阻率小而热导率大的金属材料，其焊接性较差。
- 2) 材料的高温塑性及塑性温度范围，即高温屈服强度大的材料（如耐热合金）、塑性温度区间较窄的材料（如铝合金），其焊接性较差。
- 3) 材料对热循环的敏感性，即易生成与热循环作用有关缺陷（裂纹、淬硬组织等）的材料（如 65Mn），其焊接性较差。
- 4) 熔点高、线膨胀系数大、硬度高等金属材料，其焊接性一般也较差。
- 当然，评定某一金属材料点焊焊接性时，应综合、全面地考虑以上各因素。

2. 低碳钢点焊

碳的质量分数 $w_c \leq 0.25\%$ 的低碳钢和碳当量 $CE \leq 0.3\%$ 的低合金钢，其点焊焊接性良好，采用普通工频交流点焊机、简单焊接循环，无需特别的工艺措施，即可获得满意的焊接质量。

点焊技术要点如下：

- 1) 焊前冷轧板表面可不必清理，热轧板应去除氧化皮、锈。
- 2) 建议采用硬规范点焊， CE 大者会产生一定的淬硬现象，但一般不影响使用。
- 3) 焊厚板（ $\delta > 3\text{mm}$ ）时建议选用带锻压力的压力曲线，选用带预热电流脉冲或断续通电的多脉冲点焊方式，选用三相低频焊机焊接等。
- 4) 低碳钢属铁磁性材料，当焊件尺寸大时应考虑分段调整焊接参数，以弥补因焊件伸入焊接回路过多而引起的焊接电流减弱。
- 5) 低碳钢板点焊的焊接参数见表 2-2-7。

表 2-2-7 低碳钢板点焊的焊接参数

板厚 /mm	电极头端 面直径 /mm	A			B			C		
		焊接电流 /A	焊接时间 /s	电极压力 /N	焊接电流 /A	焊接时间 /s	电极压力 /N	焊接电流 /A	焊接时间 /s	电极压力 /N
0.4	3.2	5200	0.08	1150	4500	0.16	750	3500	0.34	400
0.5	4.8	6000	0.10	1350	5000	0.18	900	4000	0.40	450

(续)

板厚 /mm	电极头端 面直径 /mm	A			B			C		
		焊接电流 /A	焊接时间 /s	电极压力 /N	焊接电流 /A	焊接时间 /s	电极压力 /N	焊接电流 /A	焊接时间 /s	电极压力 /N
0.6	4.8	6600	0.12	1500	5500	0.22	1000	4300	0.44	500
0.8	4.8	7800	0.14	1900	6500	0.26	1250	5000	0.50	600
1.0	6.4	8800	0.16	2250	7200	0.34	1500	5600	0.60	750
1.2	6.4	9800	0.20	2700	7700	0.38	1750	6100	0.66	850
1.6	6.4	11500	0.26	3600	9100	0.50	2400	7000	0.86	1150
1.8	8.0	12500	0.28	4100	9700	0.54	2750	7500	0.96	1300
2.0	8.0	13300	0.34	4700	10300	0.60	3000	8000	1.06	1500
2.3	8.0	15000	0.40	5800	11300	0.74	3700	8600	1.28	1800
3.2	9.5	17400	0.54	8200	12900	1.0	5000	10000	1.74	2600

注：1. 本表节选自 RWMA 规范，焊接时间栏内数据已按电源频率 50Hz 修订。

2. A—硬规范，C—软规范，B——般规范。

3. 可淬硬钢点焊

可淬硬钢如 45、30CrMnSiA、12Cr13、65Mn 等，其点焊焊接性差，点焊接头极易产生缩松、缩孔、脆性组织、过烧组织和裂纹等缺陷。缩松与缩孔缺陷均产生于熔核凝固过程后期，分布在贴合面附近，使点焊接头力学性能变坏，尤其引发裂纹后会显著降低焊点持久抗拉强度；脆性组织马氏体产生在熔核凝固后的接头继续冷却过程中，当随机回火热处理不适当时，在接头高应力区的板缝附近仍可存在并引发冷裂纹，由于点焊接头的搭接结构特点和当前点焊质量控制技术水平所限，高应力区（残留）淬硬很难完全避免；过烧组织产生在熔核与工件表面之间，是多脉冲回火热处理点焊工艺必须重视的一种缺陷，它不仅使接头抗疲劳性能显著降低，而且使接头的耐蚀性下降；熔核内裂纹严重时可贯穿贴合面而与板缝相通，它与热影响区产生的冷裂纹一样均是最危险的缺陷，但由于往往是由缩松或缩孔所引发的，因而较易解决。

点焊的技术要点如下：

1) 电极压力和焊接电流选择：在保证熔核直径的条件下，焊接电流脉冲值应选择偏小，以使熔核熔透率接近设计值下限（50%~60%为宜），电极压力值应选择较大，为相同板厚低碳钢点焊时的 1.5~1.7 倍，或采用可预调制的焊接电流脉冲波形（即用热量递增控制以减轻或避免初期内飞溅）。

2) 双脉冲点焊工艺：这种点焊工艺为焊接电流脉冲加 1 个回火热处理脉冲，配合适当会得到高强度的点焊接头，撕破试验时接头呈韧性断裂，可撕出圆孔。这里应注意，两脉冲之间的间隔时间一定要保证使焊点冷却到马氏体转变点 M_s 温度以下。同时，回火电流脉冲幅值要适当，以避免焊接区金属加热重新超过奥氏体相变点而引起二次淬火。

双脉冲点焊焊接参数可参见表 2-2-8。

表 2-2-8 30CrMnSiA 钢带回火双脉冲点焊的焊接参数

板厚/mm	电极工作面 直径/mm	电极压力 /kN	焊接脉冲		间隔时间/s	回火脉冲	
			焊接电流/kA	时间/s		回火电流/kA	时间/s
1.0	5~5.5	1~1.8	5~6.5	0.44~0.64	0.5~0.6	2.5~4.5	1.2~1.4
1.5	6~6.5	1.8~2.5	6~7.2	0.48~0.70	0.5~0.6	3.0~5.0	1.2~1.6
2.0	6.5~7	2~2.8	6.5~8.0	0.50~0.74	0.5~0.6	3.5~6.0	1.2~1.7
2.5	7~7.5	2.2~3.2	7.0~9.0	0.60~0.80	0.6~0.7	4.0~7.0	1.3~1.8

3) 多脉冲回火热处理点焊工艺：这种点焊工艺为焊接电流脉冲加多个回火热处理脉冲（回火脉冲次数 $n \geq 3$ ），许多研究和生产实践表明，传统的双脉冲点焊工艺，难以稳定地保证接头组织的充分回火及合理分布，在高应力区仍有马氏体存在，出现脆性断口形貌，力学性能不高，而采用多

脉冲回火点焊工艺能有效而稳定地对接头显微组织和分布予以控制，使高应力区获得充分回火，得到韧性断口形貌，使力学性能，尤其是疲劳性能获得显著提高。同时，由于增加了回火参数的调整裕度，降低了对点焊控制设备精度的要求。

目前，多脉冲点焊工艺正在进一步试验和推广中。

4. 不锈钢点焊

按钢的组织可将不锈钢分为奥氏体型、铁素体型、奥氏体—铁素体型、马氏体型和沉淀硬化型等。其中马氏体不锈钢由于可淬硬、有磁性，其点焊焊接性与前述可淬硬钢相近，故点焊技术可参阅淬硬钢点焊所述，考虑到该型钢具有较大的晶粒长大倾向，焊接时间参数一般应选择得小些。

奥氏体不锈钢、奥氏体—铁素体不锈钢点焊焊接性良好，尤其是电阻率高（为低碳钢的5~6倍），热导率低（为低碳钢的1/3）以及不存在淬硬倾向和不带磁性（奥氏体—铁素体不锈钢有磁性），因此无需特殊的工艺措施，采用普通交流点焊机、简单焊接循环即可获得满意的焊接质量。

点焊的技术要点如下：

- 1) 可用酸洗、砂布打磨或毡轮抛光等方法进行焊前表面清理，但对用铅锌或铝锌模成形的焊件必须采用酸洗方法。
- 2) 采用硬规范、强烈的内部和外部水冷，可显著提高生产率和焊接质量。
- 3) 由于高温强度大、塑性变形困难，应选用较高的电极压力，以避免产生喷溅和缩孔、裂纹等缺陷。
- 4) 板厚大于3mm时，常采用多脉冲焊接电流来改善电极工作状况，其脉冲较点焊等厚度的低碳钢时要短且疏。这种多脉冲措施也可用后热处理。
- 5) 不锈钢点焊的焊接参数参见表2-2-9。

表 2-2-9 不锈钢点焊的焊接参数

厚度/mm	电极端头直径/mm	焊接电流/A	焊接时间/s	电极压力/N
0.3	3.0	3000 ~ 4000	0.04 ~ 0.06	800 ~ 1200
0.5	4.0	3500 ~ 4500	0.06 ~ 0.08	1500 ~ 2000
0.8	5.0	5000 ~ 6500	0.10 ~ 0.14	2400 ~ 3600
1.0	5.0	5800 ~ 6500	0.12 ~ 0.16	3600 ~ 4200
1.2	6.0	6500 ~ 7000	0.14 ~ 0.18	4000 ~ 4500
1.5	5.5 ~ 6.5	6500 ~ 8000	0.18 ~ 0.24	5000 ~ 5600
2.0	7.0	8000 ~ 10000	0.22 ~ 0.26	7500 ~ 8500
2.5	7.5 ~ 8.0	8000 ~ 11000	0.24 ~ 0.32	8000 ~ 10000
3.0	9 ~ 10	11000 ~ 13000	0.26 ~ 0.34	10000 ~ 12000

注：1. 适用于06Cr19Ni10、12Cr18Ni9、1Cr18Ni9Ti^①、2Cr13Ni4Mn9^①、1Cr18Mn8Ni5^①、1Cr19Ni11Si4AlTi^①的点焊。

2. 点焊2Cr13Ni4Mn9时电极压力应比表中值大50%~100%。

① GB/T 20878—2007《不锈钢和耐热钢 牌号及化学成分》中无与之对应的新牌号，考虑目前还有应用，保留了旧标准牌号。后同。

5. 镀层钢板点焊

镀层钢板主要有镀锌板、镀铝板、镀铅板、镀锡板、贴塑板等。其中贴聚氯乙烯塑料面钢板焊接时，除保证必要的强度外，还应保证贴塑面不被破坏，因此必须采用单面点焊和较短的焊接时间，在大多数的情况下，焊件均设计成凸焊结构。

由于低熔点镀层的存在，不仅使焊接区的电流密度降低，而且使电流场的分布不稳定。增大焊接电流又进一步促进了电极工作端面铜与镀层金属形成固溶体及金属间化合物等合金，加快了电极粘损和镀层的破坏。同时，低熔点的镀层金属使熔核在结晶过程中产生裂纹和气孔。因此，镀层钢板合适的点焊焊接参数范围窄，接头强度波动大，电极修整频繁，焊接性较差。

镀层钢板点焊的技术要点如下：

- 1) 镀层钢板点焊需要比普通钢板点焊更大的焊接电流和电极压力，约提高1/3以上。

- 2) 电极材料应选用 CrZrCu 合金或弥散强化铜、或镶钨复合电极,并允许采用内部和外部的强烈水冷却。同时,电极的两次修磨间的焊点数应仅为低碳钢时的 1/20 ~ 1/10。
- 3) 在结构允许条件下改用凸焊是一行之有效的措施,再配之以缓升或直流焊接电流波形会进一步提高焊接质量。
- 4) 点焊时应采取有效的通风措施,以防止锌、铅等元素的金属蒸气和氧化物尘埃对人体健康的侵害。
- 5) 镀锌钢板点焊的焊接参数见表 2-2-10。

表 2-2-10 镀锌钢板点焊的焊接参数

镀层种类		电镀锌			热浸镀锌		
镀层厚/ μm		2 ~ 3	2 ~ 3	2 ~ 3	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 25
焊接条件	级别	板厚/mm					
		0.8	1.2	1.6	0.8	1.2	1.6
电极压力/kN	A	2.7	3.3	4.5	2.7	3.7	4.5
	B	2.0	2.5	3.2	1.7	2.5	3.5
焊接时间/cyc	A	8	10	12	8	10	12
	B	10	12	15	10	12	15
焊接电流/kA	A	10.0	11.5	14.5	10.0	12.5	15.0
	B	8.5	10.5	12.0	9.9	11.0	12.0
拉剪载荷/kN	A	4.6	6.7	11.5	5.0	9.0	13
	B	4.4	6.5	10.5	4.8	8.7	12

6. 钛合金点焊

钛及钛合金是一种优良的金属材料,点焊结构中主要用 α 钛合金 (TA7 等) 和 $\alpha + \beta$ 钛合金 (TC4 等),由于其热物理性能与奥氏体不锈钢近似,故点焊焊接性良好,点焊时也不需要保护气体。

点焊的技术要点如下:

- 1) 一般可不进行表面清理,当表面氧化膜较厚时可进行化学清理:硝酸 45%、氢氟酸 20%、水 35% 混合液,或氢氟酸 20%、硫酸 30%、水 50% (体积分数) 的混合液中 (室温) 浸蚀 2 ~ 3min,然后用流动冷水冲洗干净。
- 2) 电极应选用 CrZrCu、BeCoCu、NiSiCrCu 合金,球形工作端面,内部水冷和必要时附加外部水冷。
- 3) 采用硬规范并配以较低的电极压力,以避免产生凸肩、深压痕等外部缺陷。
- 4) 点焊时冷却速度快,会产生针状马氏体 (α' 相) 组织,使硬度提高、韧性下降。因此对 α 钛合金建议采用焊后退火处理;对 $\alpha + \beta$ 钛合金可采用带回火双脉冲点焊工艺。
- 5) 钛合金的点焊焊接参数参见表 2-2-11。

表 2-2-11 钛合金的点焊焊接参数

板厚/mm	电极工作端面 半径/mm	球面电极圆半径 /mm	电极压力 /kN	焊接电流 /kA	通电时间 /s
0.8	4 ~ 5	50	2.2 ~ 2.5	5 ~ 6	0.10 ~ 0.16
1.0	4.5 ~ 5.5	75	2.5 ~ 3.0	6 ~ 7	0.16 ~ 0.20
1.2	5 ~ 5.5	75	3.2 ~ 3.5	6.5 ~ 7.5	0.20 ~ 0.26
1.5	5.5 ~ 6	100	4.0 ~ 5.0	8 ~ 8.5	0.26 ~ 0.30
2.0	6 ~ 7	100	5.0 ~ 6.0	9 ~ 10	0.28 ~ 0.32
2.5	7 ~ 8	150	6.0 ~ 7.0	11 ~ 12	0.30 ~ 0.40

7. 铝合金点焊

铝合金分为冷作强化型铝合金和热处理强化型铝合金。冷作强化型铝合金常见牌号有 3A21

(LF21)、5A02 (LF2)、5A06 (LF6) 等，热处理强化型铝合金常见牌号有 2A12-T4 (LY12CZ)、7A04-T (LC4CS) 等，其焊接性均较差。

铝合金点焊的技术要点如下：

- 1) 焊前必须按工艺文件仔细进行表面化学清洗，并规定焊前存放时间。
- 2) 电极一般选用 CdCu 合金，端面推荐用球形面并注意经常清理，电极应冷却良好。
- 3) 采用硬规范：焊接电流常为相同板厚低碳钢的 4~5 倍，因此功率强大的点焊机是焊铝的基本条件。
- 4) 波形选择：除板厚 $\delta < 1.2\text{mm}$ 的冷作强化型铝合金可以用工频交流波形点焊外，板厚较大的冷作强化型铝合金及所有热处理强化型铝合金一律推荐用直流冲击波、三相低频和直流焊机点焊。
- 5) 焊接循环：采用缓升、缓降的焊接电流，可起到预热和缓冷作用；具有阶形或马鞍形压力变化曲线可提供较高的锻压力；高精度的控制器可保证各程序的准确性，尤其是锻压力的施加时间。这样的点焊循环对防止喷溅、缩孔及裂纹等缺陷至关重要。
- 6) 铝合金点焊焊接参数见表 2-2-12 和表 2-2-13。

表 2-2-12 铝合金直流冲击波点焊焊接参数

铝合金 种类	焊件厚度 /mm	电极球 面半径 /mm	电极加 压方式	电极压力/N		焊接电流 /kA	锻压开 始时间 /s	焊接通 电时间 /s	熔核直径 /mm
				焊接	锻压				
非热处 理强化 铝合金	0.8+0.8	75	恒压	1960~2450	—	25~28	—	0.04~0.08	—
	1.0+1.0	100		2450~3528	—	29~32	—	0.04	—
	1.5+1.5	150		3430~3920	—	35~40	—	0.06	—
	2.0+2.0	200		4410~4900	—	45~50	—	0.10	—
	2.5+2.5			5800~6370	—	49~55	—	0.10~0.14	—
	3.0+3.0		7840	21560	57~60	0.12	0.12~0.18	—	
热处理 强化铝 合金	0.5+0.5	75	阶梯形 压力	2250~3038	2940~3136	19~26	0.06	0.02	3.0~3.2
	0.8+0.8	100		3136~3430	4900~7840	26~36	0.06	0.04	4.0
	1.0+1.0			3528~3920	7840~8820	29~36	0.06	0.04	4.5
	1.3+1.3			3920~4116	9800~10290	40~46	0.08	0.04	5.3
	1.6+1.6	150		4900~5782	13230~13700	45~54	0.08	0.06	6.4
	1.8+1.8	200		6664~7154	14700~15680	50~55	0.12	0.06	7.0
	2.0+2.0			6860~8820	18620~19110	70~75	0.12	0.10	7.6
	2.5+2.5			7840~10780	24500~25480	80~85	0.12	0.14	9.1
	3.0+3.0			10780~11760	29400~31360	80~85	0.20	0.16	9.3

表 2-2-13 铝合金在三相点焊机上的点焊焊接参数

板厚 /mm	电极直径 /mm	电极球面 半径 /mm	电极压力/kN		通电时间/ms		电 流/A		熔核直径 /mm
			焊接	锻压	焊接	后热	焊接	后热	
三相整流式焊机									
0.5	16	75	2.4	5.2	20	无	22000	无	3
1.0	16	75	3.0	7.0	40	无	28000	无	4.1
1.6	16	200	5.0	13.2	80	80	43000	36000	6.5
2.0	23	200	6.6	17.3	100	140	52000	42000	7.5
3.2	23	200	11.4	30	160	340	69000	54000	11
三相变频式焊机									
0.5	16	75	2.3	无	10	无	26000	无	3.2
1.0	16	100	3.2	8.2	20	60	36000	9000	4.1
1.6	16	150	5.9	13.6	40	80	54000	18900	6.5
2.0	23	150	9.1	19.6	40	80	65000	22700	7.5
3.2	23	200	18.2	40.9	60	160	100000	45000	11

8. 镁合金点焊

镁合金由于具有密度低、比强度及比刚度高、导热性和电磁屏蔽性好、阻尼性能优秀、可以回收利用等优点，被认为是 21 世纪最有应用潜力的“绿色材料”。目前，点焊结构中实际应用的主要是变形镁合金（AZ31B、AZ91A 等）。

镁合金点焊焊接要点基本与铝合金相同，但要注意镁合金表面更易氧化，使接触电阻增大和不稳定，当通过大的焊接电流时，易产生喷溅，并且由于导热性好和线膨胀系数大，熔核收缩快，易引起缩孔和裂纹缺陷。同时，镁合金母材晶间存在低熔点偏析，加热时晶界会熔化和再结晶。在用工频交流点焊机点焊时的焊接参数见表 2-2-14，在用低频焊机点焊时的焊接参数见表 2-2-15。

表 2-2-14 镁合金点焊焊接参数（选用单相交流点焊机）

板厚 /mm	电极直径 /mm	电极端部 半径/mm	电极压力 /N	通电时间 /s	焊接电流 /kA	焊核直径 /mm	最小剪切力 /N
0.4+0.4	6.5	50	1372	0.05	16~17	2~2.5	313.6~617.4
0.5+0.5			1372~1568		18~20	3~3.5	421.4~784
0.65+0.65			1568~1764	0.05~0.07	22~24	3.5~4.0	578.2~960.4
0.8+0.8			1764~1960	0.07~0.09	24~26	4~4.5	784~1195.6
1.0+1.0	13	100	1960~2254	0.09~0.1	26~28	4.5~5.0	980~1519
1.3+1.3			2254~2450	0.09~0.12	29~30	5.3~5.8	1323~1911
1.6+1.6			2450~2646	0.1~0.14	31~32	6.1~6.9	1695.4~2401
2+2	16	125	2842~3136	0.14~0.17	33~35	7.1~7.8	2205~3038
2.6+2.6	19	150	3332~3528	0.17~0.2	36~38	8.0~8.6	2793~3822
3.0+3.0			4214~4410	0.2~0.24	42~45	8.9~9.6	3528~4802

表 2-2-15 镁合金点焊焊接参数（选用低频点焊机）

板厚/mm	电极端部 半径/mm	电极压力/kN		焊接时间/s	焊接电流/kA	锻压时间/s
		焊接时	锻压时			
0.8+0.8	75	1.96	3.92	0.06	26	0.08
1.0+1.0	75	2.45	5.88	0.08	28	0.10
1.5+1.5	100	3.43	7.84	0.10	35	0.12
2.0+2.0	100	4.41	9.81	0.14	41	0.16
2.5+2.5	150	5.43	13.73	0.16	43	0.20
3.0+3.0	150	6.38	19.72	0.20	48	0.28
4.0+4.0	150	7.84	25.51	0.24	53	0.32

2.2 凸焊

凸焊（Projection Welding）是在一工件的贴合面上预先加工出一个或多个凸点，使其与另一工件表面相接触并通电加热，然后压塌，使这些接触点形成焊点的电阻焊方法。凸焊是点焊的一种变形。凸焊主要用于焊接低碳钢和低合金钢的冲压件，板件凸焊最适宜的厚度为 0.5~4mm，小于 0.25mm 时宜采用点焊。随着汽车工业的发展，高生产率的凸焊在汽车零部件制造中获得大量应用。凸焊在线材、管材等连接上也应用普遍。

凸焊有如下基本特点：

1) 凸焊与点焊一样是热—机械（力）联合作用的焊接过程。相比较而言，其机械（力）的作用和影响要大于点焊，如对设备加压机构的随动性要求、对接头形成过程的影响等。

- 2) 在同一个焊接循环内，可高质量的焊接多个焊点，而焊点的布置也不必像点焊那样受到点距的严格限制。
- 3) 由于电流在凸点处密集，可用较小的电流焊接，获得可靠的熔核和较浅的压痕。尤其适合镀层板焊接的要求。
- 4) 需制作凸点、凸环等，增加了凸焊成本，有时还会受到焊件结构的制约。

2.2.1 凸焊的一般工艺

1. 凸焊方法

根据凸焊接头的结构形式，可对凸焊方法进行分类。常用凸焊方法及特点见表2-2-16，凸焊类型实例如图2-2-21所示。

表 2-2-16 凸焊方法及特点

凸焊类型	接头结构形式	应用
单点凸焊 多点凸焊	凸点设计成球形、圆锥形和方形,并预先压制在薄件或厚件上	最广,多点凸焊在凸焊机上进行,最多一次焊 20 点;单点凸焊也可在点焊机上进行
环焊	在一个工件上预制出凸环或利用工件原有的型面、倒角构成的锐边,焊后形成一条环焊缝	很广,密封性焊缝应在直流焊机上进行,最大 $\phi 80\text{mm}$,非密封性焊缝也可在交流焊机进行;管壳、螺母、注液口等
T 形焊	在杆形件上预制出单个或多个球形、圆锥形、弧面形及齿形等凸点,一次加压通电焊接	点焊机或凸焊机上进行;螺钉、管—板等 T 形接头
滚凸焊	在面板上预先制出多个圆凸点或长凸点,用滚轮电极压紧工件,电流仅在有凸点位置才通过,电极与工件连续转动	专用滚凸焊机;汽车制动蹄等
线材交叉焊	利用线材(包含管材)轮廓的凸起部分相互交叉接触	较广,可在凸焊机或多点焊机上进行;网片焊接等

2. 凸焊接头的结合特点

根据凸焊方法的不同，凸焊接头可为熔化连接或固相连接。其中，单点凸焊、多点凸焊和线材交叉焊多为熔化连接；环焊、T形焊和滚凸焊等多为固相连接。这是因为环焊、T形焊的贴合面范围大，焊接区体积大，加热不均匀所致；滚凸焊是在滚动的动态过程中焊接，压力作用不充分。因此，这些凸焊方法大都采用软规范以达到良好控制焊接热过程的目的。由于焊接区电流密度的减小、散热作用的相对增加，使焊接区温度场往往比熔点低。但是，由于凸点、凸环在焊接过程中的迅速压溃、消失，使焊接区产生很大的塑性变形，这不仅使贴合面处的氧化膜易于破碎挤出，而且促进了焊接区的再结晶，使晶界转移完全及获得细晶粒区，显著提高了连接强度，这就保证了固相连接的可靠性。

3. 凸焊工艺特点

如前所述，单点凸焊工艺在许多方面优于点焊，如表面清理就比点焊要求低些。多点凸焊和环焊等应注意以下问题：

- 1) 焊前表面必须认真清理。
- 2) 各凸点或凸环沿圆周高度必须均匀一致。
- 3) 电极随动性必须良好，以防止初期喷溅。
- 4) 必须防止焊接过程中的凸点移位。

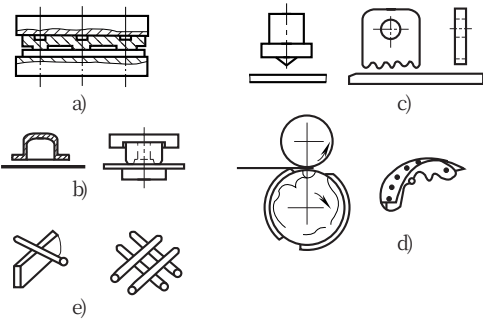


图 2-2-21 凸焊类型实例

- a) 多点凸焊 b) 环焊 c) T 形焊
d) 滚凸焊（制动蹄） e) 线材交叉焊

5) 环焊密封性在批量生产中较难保证,需在凸环结构设计、焊接夹具、焊机等多方面采取措施。

一般来讲,上述问题不是仅仅调整焊接参数就能解决,而是要在焊接条件上,如凸焊接头结构合理性、凸焊电极(如可转动自平衡电极等)、凸焊模具和夹具,采用带预热脉冲的控制器、直至采用高精度的直流焊机和滚动摩擦加压机构等。

凸焊电极、模具选择等可参见第2篇2.5.3节相关内容。

4. 凸点设计

凸焊搭接接头的设计与点焊相似。通常其搭接量比点焊小,且凸点间距没有严格限制,当一个工件表面质量要求较高时,凸点应冲在另一工件上。同时,为保证凸点有一定刚度,一般情况下凸点应冲在较厚的板上。

应该注意,不同资料给出的凸点尺寸往往相差甚远,应根据具体情况做试验修正。

凸点形状(见图2-2-22)以圆球形及圆锥形应用最广,后一种可提高凸点刚度,预防凸点过早压溃,还可以减小因焊接电流密度过大而引发初期喷溅。带溢出环形槽的凸点,可防止压塌的凸点金属挤在加热不良的周围间隙内引起电流密度的降低,造成未焊透。凸焊的凸点尺寸见表2-2-17;带凸点螺母及其上凸点尺寸见表2-2-18和如图2-2-23所示。

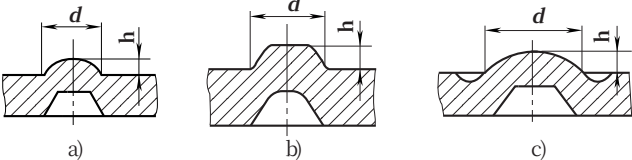


图 2-2-22 凸点形状

a) 圆球形 b) 圆锥形 c) 带环形溢出槽形

表 2-2-17 凸焊的凸点尺寸 (单位: mm)

凸点所在板厚	平板厚	凸点尺寸	
		直径 d	高度 h
0.5	0.5	1.8	0.5
	2.0	2.3	0.6
1.0	1.0	1.8	0.5
	3.2	2.8	0.8
2.0	1.0	2.8	0.7
	4.0	4.0	1.0
3.2	1.0	3.5	0.9
	5.0	4.5	1.1
4.0	2.0	6.0	1.2
	6.0	7.0	1.5
6.0	3.0	7.0	1.5
	6.0	9.0	2.0

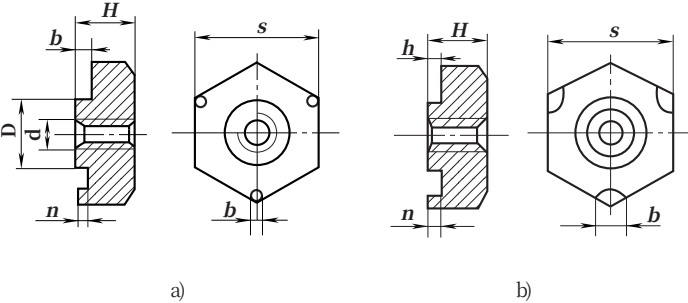


图 2-2-23 带凸点的螺母

a) 带圆凸点 b) 带弧形凸点

表 2-2-18 带凸点螺母的设计尺寸 (单位: mm)

螺纹规格 d	D	带圆凸点					带弧形凸点				
		s	H	b	h	n	s	H	b	h	n
M4	8	13	6	2.2	1.5	1	12	5.5	4	1.0	0.5
M5	8	13	6	2.2			12	5.5	4		
M6	8	13	6	2.2			13	6.0	4.5		
M8	11	17	7	3.0			16	7.5	5		
M10 × 1.25	13	19	8	3.0			17	8.5	6		
M12 × 1.25	15.5	22	10	3.5			—	—	—		

5. 凸焊焊接参数的选择

凸点形状、尺寸确定后,焊接电流、焊接时间及电极压力等参数对接头质量均有影响,其影响规律与点焊时相似。应该注意的是,电极压力对接头拉剪载荷的影响比点焊时要严重得多(见图 2-2-24)。若电极压力过小,将使通电前凸点预变形量太小,凸点贴合面电流密度显著增大造成严重喷溅、甚至烧穿;而电极压力过大将使通电前凸点预变形量太大,失去凸焊意义。此外,焊接电流波形、压力变化曲线及焊机加压系统的随动性也都对凸焊质量有重要的影响。

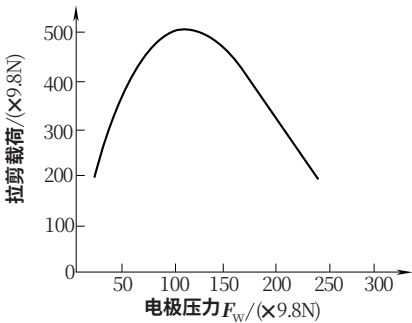


图 2-2-24 凸焊接头拉剪载荷与电极压力关系

2.2.2 常用金属材料的凸焊

1. 低碳钢的凸焊

低碳钢的凸焊应用最广泛,凸点形状为圆球形或圆锥形。这里应注意两点:凸点通常应冲制在较厚的板上;厚度小于 0.25mm 的薄钢板凸焊不被推荐,因凸点易提前压溃,不如点焊适用。低碳钢凸焊参数的选择见表 2-2-19 ~ 表 2-2-24。

表 2-2-19 低碳钢薄板凸焊的焊接参数

板厚	点距	焊核直径	A 参数			B 参数			C 参数		
			时间/周	电极压力 /N	焊接电流 /A	时间/周	电极压力 /N	焊接电流 /A	时间/周	电极压力 /N	焊接电流 /A
0.6	7	2.5	3	800	5000	6	700	4300	6	500	3300
0.8	9	3	3	1100	6600	6	700	5100	10	600	3800
0.9	10	4	5	1300	7300	8	900	5500	13	650	4000
1.0	10	4	8	1500	8000	10	1000	6000	15	700	4300
1.2	12	5	8	1800	8800	16	1200	6500	19	1000	4600
1.5	15	6	10	2500	10300	20	1600	7700	25	1500	5400
1.8	18	7	13	3000	11300	25	2000	8000	32	1800	6000
2.0	18	7	14	3600	11800	28	2400	8800	34	2100	6400
2.5	23	8	16	4600	14100	32	3100	10600	42	2800	7500
3.0	27	9	18	6800	14900	38	4500	11300	50	3600	8300

注: 1. A 参数用于单个凸点或者凸点间距大于表中数值 1.5 ~ 2.0 倍情况。
2. B 参数用于 2 个凸点的情况。
3. C 参数用于多个凸点,且点距较小的情况。
4. 表中焊接电流、电极压力均指每个凸点的数值。

表 2-2-20 低碳钢厚板单点凸焊的焊接参数

板厚 /mm	凸点尺寸/mm		最小间 距/mm	电极压力/N		递增时 间/周	焊接时 间/周	焊接电流 /kA	焊点抗 剪力/N
	直径	高度		焊接	锻压				
正常凸点									
4	8.5	1.65	45	9560	19000	12	54	15.8	34700
5	10.5	2.13	51	13000	26000	17	84	18.8	50000
6	12.5	2.60	61	16700	33400	25	121	23.3	76900
小尺寸凸点									
4	7.0	1.52	41	6300	12600	12	54	11.5	24600
5	8.5	1.83	44	7100	14200	17	84	13.9	34200
6	9.5	2.16	43	8900	17800	25	121	17.3	53300

注：1. 本表为单点凸焊的焊接参数。
2. 不同厚度的板组对时，参数应按较薄的一面选，但凸点应尽可能加工在厚板上。
3. 正常凸点用于单点凸焊，小尺寸凸点用于多点凸焊。
4. 焊接电流应选用缓升或直流波形，厚板时应加大锻压力。

表 2-2-21 焊接螺母凸焊的焊接参数

螺纹规格	平板厚度 /mm	A 参数			B 参数			接头扭矩 /(N·m)
		时间/周	电极压力/N	焊接电流/A	时间/周	电极压力/N	焊接电流/A	
M4	1.2	3	3000	10000	6	2400	8000	
	2.3	3	3200	11000	6	2600	9000	
M8	2.3	3	4000	15000	6	2900	10000	82
	4.0	3	4300	16000	6	3200	12000	
M12	1.2	3	4800	18000	6	4000	15000	210
	4.0	3	5200	20000	6	4200	17000	

表 2-2-22 低碳钢丝交叉接头凸焊的焊接参数

钢丝直径/mm	时间/周	15% 压下量时的参数			30% 压下量时的参数		
		电极压力/N	焊接电流/A	焊点抗剪力/N	电极压力/N	焊接电流/A	焊点抗剪力/N
冷拔丝							
1. 60	4	445	600	2000	670	800	2220
3. 20	8	556	1800	4300	1160	2700	5000
4. 80	14	1600	3300	8900	2670	5000	10700
6. 40	19	2600	4500	16500	3780	6700	18700
7. 90	25	3670	6200	22700	6450	9300	27100
9. 50	33	4890	7400	29800	9170	11300	37000
11. 10	42	6300	9300	42700	12900	13800	50200
12. 70	50	7600	10300	54300	15100	15800	60500
热拔丝							
1. 60	4	445	800	1600	670	800	1780
3. 20	8	556	2800	3300	1160	2800	3800
4. 80	14	1600	5100	6700	2670	5100	7500
6. 40	19	2600	7100	12500	3780	7100	13400
7. 90	25	3670	9600	20500	6450	9600	22300
9. 50	33	4890	11800	27600	9170	11800	30300
11. 10	42	6300	14800	39100	12900	14800	42700
12. 70	50	7600	16500	51200	15100	16500	55170

注：压下量指电阻焊中一根钢丝压入另一根钢丝的数量。

表 2-2-23 管子十字形交叉凸焊的焊接参数

压下量(%)	管子外径/mm	壁厚/mm	电极压力/N	时间/周	焊接电流/A
5	10	0.9	2000	12	5000
	16	1.0	2000	15	9500
	22	1.25	2200	20	12000
	25	1.5	2400	17	14000
	30	1.5	2400	17	16000
	35	2.0	2700	20	18000
15	10	0.9	2000	40	9000
	16	1.0	2000	60	9500
	22	1.25	2200	60	12000
	25	1.5	2400	57	14000
	30	1.5	2400	55	16000
	35	2.0	2700	75	18000

表 2-2-24 管子 T 形接头凸焊的焊接参数

管子外径/mm	壁厚/mm	电极压力/N	时间/周	焊接电流/A	熔深/mm
9.6	1	1900	0.20	11000	2.5
12.4	1	2100	0.20	12000	2.8
16.0	1	2100	0.30	13000	3.1
17.6	1.25	2300	0.40	13000	3.5
19.2	1.25	2300	0.40	14000	4.0
22.4	1.25	2300	0.50	14000	4.3
25.4	1.5	2400	0.60	14500	5.0
28.6	1.5	2500	0.60	15000	5.5
30.2	1.5	2500	0.80	15000	6.0
31.8	1.5	2500	1.10	16000	6.3
35.0	2.0	2700	1.30	19000	7.0

2. 镀层钢板的凸焊

金属镀层有 Zn、Pb、Al、Cu、Ni 等，遇到最多的是镀锌钢板或镀锌件，由于凸点的存在和采用平电极，镀层板的凸焊比点焊容易得多。镀锌钢板凸焊焊接参数的选择见表 2-2-25。

表 2-2-25 镀锌钢板凸焊焊接参数

凸点所在板厚/mm	平板板厚/mm	凸点尺寸/mm		电极压力/kN	焊接时间/周	焊接电流/kA	拉剪载荷/kN	熔核直径/mm
		直径 d	高度 h					
0.7	0.4	4.0	1.2	0.5	7	3.2	—	—
	1.6	4.0	1.2	0.7	7	4.2	—	—
1.2	0.8	4.0	1.2	0.35	10	2.0	—	—
	1.2	4.0	1.2	0.6	6	7.2	—	—
1.0	1.0	4.2	1.2	1.15	15	10.0	4.2	3.8
1.6	1.6	5.0	1.2	1.8	20	11.5	9.3	6.2
1.8	1.8	6.0	1.4	2.5	25	16.0	14	6.2
2.3	2.3	6.0	1.4	3.5	30	16.0	19	7.5
2.7	2.7	6.0	1.4	4.3	33	22.0	22	7.5

3. 贴塑钢板的凸焊

这种钢板的一面因有绝缘的聚氯乙烯塑料层只能单面单点或单面双点凸焊。焊接时采用硬规范，为了使贴塑面不产生明显压痕，可采用与贴塑面钢板相同花纹的钢板作垫板，凸点采用圆球形，当特别要求强度高时可采用图 2-2-25 所示的环形凸点（其中 C 形结构最优）。

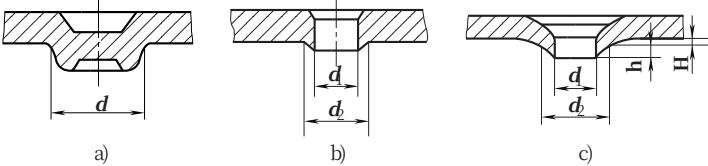


图 2-2-25 贴塑钢板使用的环形凸点

贴塑钢板凸焊参数选择见表 2-2-26 和表 2-2-27。

表 2-2-26 贴塑钢板圆球形凸点凸焊的焊接参数

板厚/mm		凸点尺寸/mm		电极压力/kN	焊接时间/ms	交流半波电流峰值/kA	拉剪载荷/kN
贴塑钢板	凸点所在钢板	直径 d	高度 h				
0.6	0.4	0.4	2.0	0.15	4	3.2	0.75
	0.6	0.3	1.8	0.15	5	3.5	0.50
0.8	0.4	0.4	1.8	0.15	5	3.2	0.65
	0.8	0.4	1.8	0.20	5	3.5	1.0
1.0	0.4	0.4	2.0	0.15	5	4.0	0.75
	1.0	0.5	2.0	0.25	5	4.5	1.0
1.2	0.6	0.6	2.6	0.25	6	5.0	1.0
	1.2	0.5	3.0	0.85	6	8.0	2.0

表 2-2-27 贴塑钢板环形凸点的凸焊焊接参数

板厚/mm		凸点尺寸/mm			交流半波式			电容储能式		拉剪载荷/kN
贴塑钢板	凸点所在钢板	d_1	d_2	h	电极压力/kN	焊接时间/周	电流峰值/kA	电容量/ μ F	电压/V	
0.6	0.6	3.5	4.2	0.5	0.2~0.3	5	9.0	3000	340	0.9
	1.6	2.0	3.0	0.4	0.2~0.4	6	9.5	4000	360	1.3
0.8	0.6	4.4	5.5	0.6	0.3~0.6	6	11.5	4900	360	1.4
	1.6	2.8	3.5	0.4	0.4~0.8	7	12.0	4000	350	2.3
1.0	0.6	4.3	5.5	0.8	0.3~0.6	7	14.0	5000	400	2.3
	1.6	3.5	4.0	0.4	0.4~0.8	7	16.5	6000	400	2.8
1.2	0.6	4.0	5.5	1.0	0.35~1	7	15.0	5500	400	2.6
	2.3	3.5	5.0	0.4	0.5~1	7	18.0	8000	430	3.0

注：表中 d_1 、 d_2 、 h 均为图 2-2-25b、c 的凸点尺寸。

可淬硬钢很少凸焊，但有时会进行线材交叉焊，由于接头会淬硬，必须进行电极间回火热处理；铝合金也很少采用凸焊，仅有时用于螺钉、螺母的凸焊等，这里不作介绍。

2.3 缝焊

缝焊（Seam Welding），焊件装配成搭接或对接接头并置于两滚轮电极之间，滚轮加压焊件并转动，连续或断续送电，形成一条连续焊缝的电阻焊方法。缝焊是点焊的一种演变。

缝焊广泛地应用在要求密封性的接头制造上，有时也用来连接普通非密封性的钣金件，被焊金属材料的厚度通常在 0.1~2.5mm。

缝焊有如下基本特点：

- 1) 缝焊与点焊一样是热—机械（力）联合作用的焊接过程。相比较而言，其机械（力）的作用在焊接过程中是不充分的（步进缝焊除外），焊接速度越快表现越明显。
- 2) 缝焊焊缝是由相互搭接一部分的焊点所组成，因此焊接时的分流要比点焊严重得多，这在高电导率铝合金及镁合金的厚板焊接时带来困难。
- 3) 滚轮电极表面易发生粘损而使焊缝表面质量变坏，因此电极的修整是一个特别值得注意的问题。
- 4) 由于缝焊焊缝的截面积通常是母材纵截面积的 2 倍以上（板越薄这个比率越大），破坏必然发生在母材热影响区。因此，缝焊结构很少强调接头强度，主要要求其具有良好的密封性和耐蚀性。

2.3.1 缝焊的一般工艺

1. 缝焊方法

根据滚轮电极旋转（焊件移动）与焊接电流通过（通电）的机—电配合方式，将缝焊方法进行分类，见表 2-2-28，各类焊接循环如图 2-2-26 所示。

表 2-2-28 缝焊方法及特点

缝焊类型	机—电特点	应 用
连续缝焊	滚轮电极连续旋转,焊件等速移动,焊接电流连续通过,每半周形成一个焊点 焊接速度可达 10~20m/min	由于焊缝表面质量较差,实际应用有限
断续缝焊	焊件连续等速移动,焊接电流断续通过,每“通—断”一次形成一个焊点 根据板厚焊接速度可达 0.5~4.3m/min	应用广泛,主要生产黑色金属气、水、油密封焊缝
步进缝焊	焊件断续移动,焊接电流在焊件静止时通过每“通—移”一次形成一个焊点,并可施加锻压力。接头形成与点焊极为近似 焊接速度较低,一般仅达 0.2~0.6m/min	仅用于制造铝合金及镁合金等高密封焊缝

按接头形式分,缝焊可分为搭接缝焊、压平缝焊、圆周缝焊、垫箔对接缝焊、铜线缝焊等。搭接缝焊用得最广,除常用的双面缝焊外,还有单面单缝缝焊、单面双缝缝焊、小直径圆周缝焊等。各种特殊缝焊方法如图 2-2-27 所示。

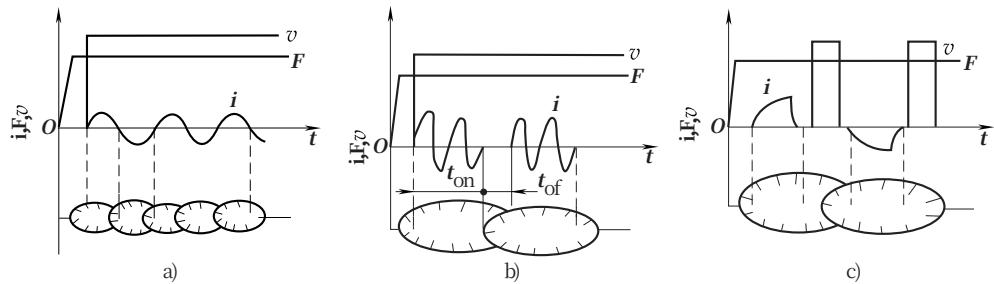


图 2-2-26 各类缝焊焊接循环示意图
a) 连续缝焊 b) 断续缝焊 c) 步进缝焊

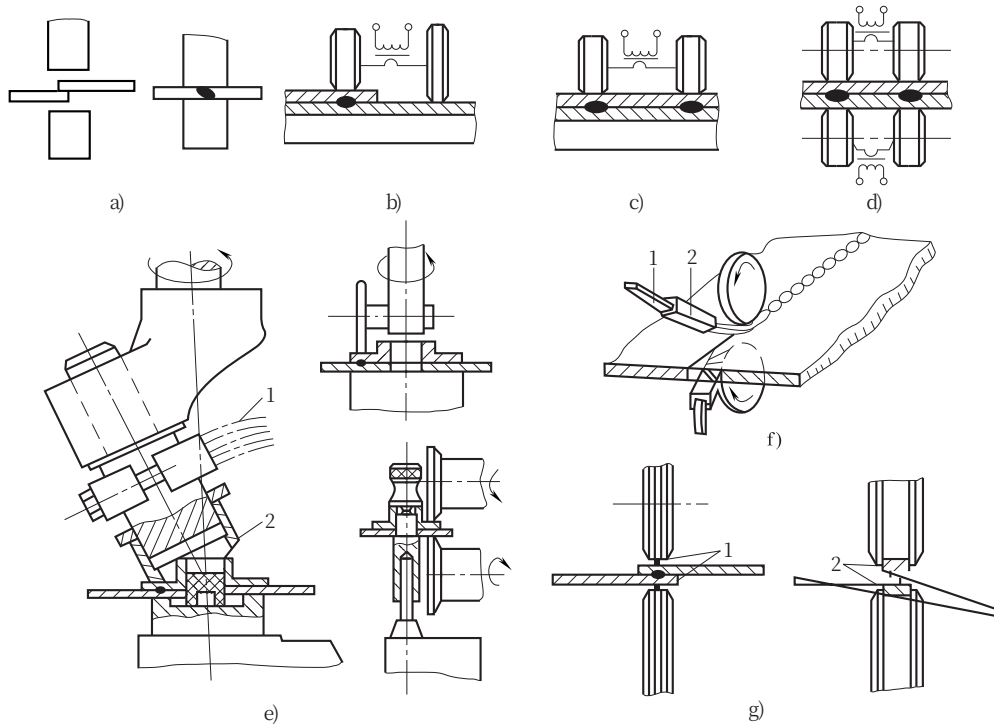


图 2-2-27 各种特殊缝焊方法

a) 压平缝焊 b) 单面单缝缝焊 c) 单面双缝缝焊 d) 双面双缝缝焊
e) 小直径圆周缝焊 (1—导电母线 2—杯形电极) f) 垫箔对接缝焊
(1—箔带 2—导向嘴) g) 铜线缝焊 (1—圆铜线 2—扁铜线)

2. 缝焊工艺特点

如前所述，由于通常缝焊接头是在动态过程中（即滚轮电极旋转）形成的，会出现压力作用不充分和表面温度比点焊高、表面粘附严重等现象。因此，应注意以下问题：

- 1) 焊前焊件表面必须认真全部或局部（沿焊缝宽约 20mm）清理；滚轮电极必须经常修整，在某些镀层板密封焊缝的焊接中，应使用专设的修整刀。
- 2) 不等厚度和不同材料缝焊时，可采用类似点焊的工艺措施，改善熔核偏移。
- 3) 必须采用点焊定位，定位点间距为 75 ~ 150mm，并注意定位焊的位置和表面质量；环形焊件定位焊后的间隙应沿圆周均布，不得过大。
- 4) 长缝焊接要注意分段调节焊接参数和焊接顺序（例如从中间向两端施焊），这主要指有磁性的焊件在工频交流焊机上施焊。

滚轮电极的选择等可参见第 2 篇 2.5.3 节的相关内容。

3. 缝焊接头设计

为保证缝焊接头质量，推荐缝焊接头尺寸见表 2-2-29。但在压平缝焊时搭接量要小得多，为板厚的 1 ~ 1.5 倍，焊后接头厚度为板厚的 1.2 ~ 1.5 倍；在垫箔对接缝焊中，所输送的两条箔带厚度一般为 0.2 ~ 0.3mm，宽度为 6mm；在镀锡薄板的铜线缝焊中，铜线可为圆形或扁平形，焊后一般不回收处理等。

在设计容器类工件时，设计上应尽可能选用便于缝焊的结构，图 2-2-28a ~ g 是按进行焊接的困难程度由易到难排列的。

缝焊焊缝代号见表 2-2-30。

表 2-2-29 缝焊接头尺寸 (单位：mm)

薄件厚度 δ	焊缝宽度 c	最小搭边宽度 b		备注
		轻合金	钢、钛合金	
0.3	2.0^{+1}_0	8	6	
0.5	2.5^{+1}_0	10	8	
0.8	3.0^{+1}_0	10	10	
1.0	3.5^{+1}_0	12	12	
1.2	4.5^{+1}_0	14	13	
1.5	5.5^{+1}_0	16	14	
2.0	$6.5^{+1.5}_0$	18	16	
2.5	$7.5^{+1.5}_0$	20	18	
3.0	$8.0^{+1.5}_0$	24	20	

注：1. 搭边尺寸不包括弯边圆角半径；缝焊双排焊缝和连接 3 个以上零件时，搭边应增加 25% ~ 35%。
2. 压痕深度 $c' < 0.15\delta$ 、焊透率 $A = 30\% \sim 70\%$ 。

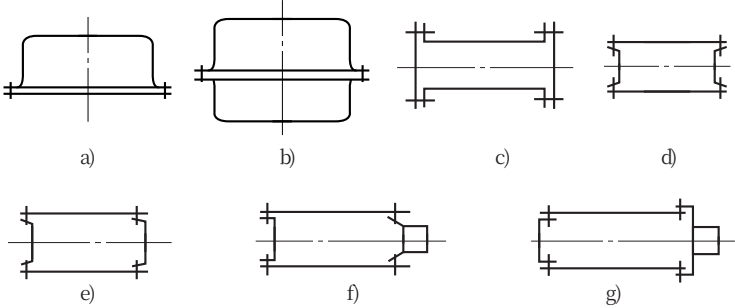
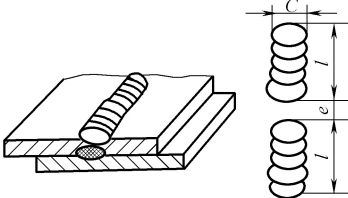
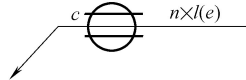


图 2-2-28 薄壁容器缝焊结构形式

表 2-2-30 缝焊焊缝代号

缝焊名称	焊缝形式	基本符号	标注方法 ^①
缝焊缝			

① n 为焊缝数量。

4. 缝焊焊接参数选择

工频交流断续缝焊在缝焊中应用最广，其主要焊接参数有焊接电流、电流脉冲时间、脉冲间隔时间、电极压力、焊接速度及滚轮电极端面尺寸。

(1) 焊接电流 I 考虑缝焊时的分流，焊接电流 I 应比点焊时增加 20% ~ 60%，具体数值视材料的导电性、厚度和重叠量（或点距）而定。

如图 2-2-29 所示，随着焊接电流的增大，焊透率及重叠量增加。应该注意，当 I 值满足接头强度要求后，继续增大 I 虽可以获得更大的焊透率和重叠量，但却不能提高接头强度（因为接头强度受板厚限制），因而是浪费的。同时，由于 I 过大，可能产生过深的压痕和烧穿，使接头质量反而降低。

(2) 电流脉冲时间 t 和脉冲间隔时间 t_0 缝焊时，可通过电流脉冲时间 t 来控制熔核尺寸，调整脉冲间隔时间 t_0 来控制熔核的重叠量，因此，二者应有适当的配合。一般说，在用较低焊接速度缝焊时 $t/t_0 = 1.25 \sim 2$ 可获良好结果。而随着焊接速度的增大将引起点距加大、重叠量降低，为保证焊缝的密封性，必将提高 t/t_0 值。因此，在采用较高的焊接速度缝焊时 $t/t_0 \approx 3$ 或更高。

随着脉冲间隔时间 t_0 的增加，焊透率及重叠量均下降（见图 2-2-30）。

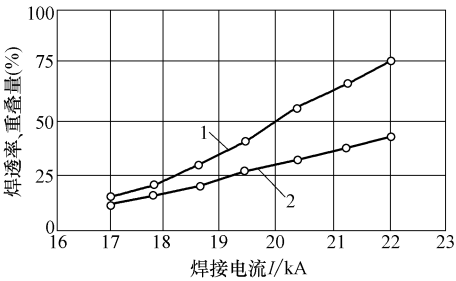


图 2-2-29 焊接电流对焊透率和重叠量的影响

(10 钢、 $\delta = 2\text{mm}$ 、 $t = 6\text{cyc}$ 、 $t_0 = 5\text{cyc}$ 、
 $F_w = 6672\text{N}$ 、 $v = 1.4\text{m/min}$)
1—焊透率 2—重叠量

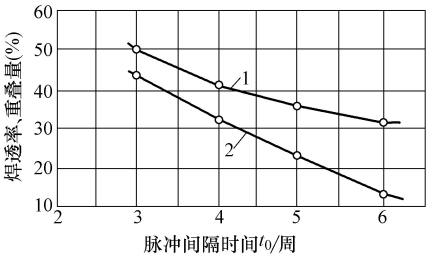


图 2-2-30 脉冲间隔时间对焊透率和重叠量的影响

(10 钢、 $\delta = 2\text{mm}$ 、 $I = 18950\text{A}$ 、 $t = 6\text{cyc}$ 、
 $F_w = 6672\text{N}$ 、 $v = 1.4\text{m/min}$)
1—焊透率 2—重叠量

(3) 电极压力 F_w 考虑缝焊时压力作用不充分，电极压力 F_w 应比点焊时增加 20% ~ 50%，具体数值视材料的高温塑性而定。

如图 2-2-31a 所示，在焊接电流较小时（曲线 1），随着电极压力的增大，将使熔核宽度显著增加（熔核宽度与重叠量有一定关系：熔核宽度增加引起点距加大，重叠率降低）、重叠量下降，破坏了焊缝的密封性；在焊接电流较大时（曲线 2—符合 RWMA 推荐参数），电极压力可以在较宽广的范围内变化，其熔核宽度（代表了重叠量）、焊透率变化较小并能符合要求。即此时电极压力的影响不像点焊时那样大。

图 2-2-31b 表明，电极压力对焊透率的影响较小。

图 2-2-31 还表明, 当焊接电流更大些时 (曲线 3), 尽管电极压力发生很大的变化, 但熔核宽度、焊透率均波动很小。但是, 不能选择这一更大的电流, 理由正如前所述, 不仅不能提高接头强度反而使接头质量降低。

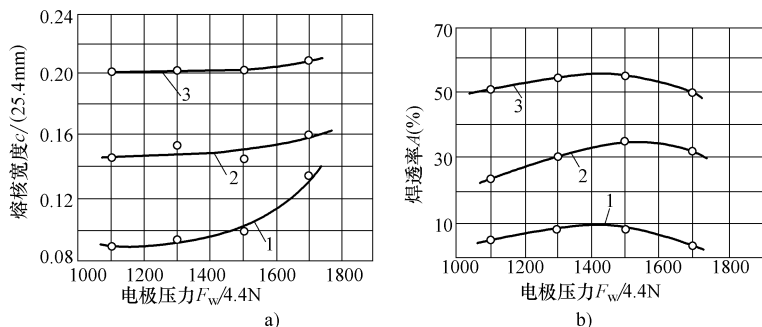


图 2-2-31 电极压力对焊透率和熔核宽度的影响

(10 钢、 $\delta=2mm$ 、 $t=6cyc$ 、 $t_0=5cyc$ 、 $v=1.4m/min$)

a) 对熔核宽度的影响 b) 对焊透率的影响

1—16100A 2—18950A 3—22050A

(4) 焊接速度 v 焊接速度是影响缝焊过程的最重要参数之一。低碳钢缝焊时, 随着焊接速度 v 的增大, 接头强度降低, 当所用焊接电流较小时, 下降的趋势更严重, 如图 2-2-32 所示。同时, 为使焊接区获得足够热量而试图提高焊接电流时, 将很快出现焊件表面过烧和电极粘损现象, 即使增大水冷也很难改善。因此, 在缝焊时试图用加大焊接电流来提高焊接速度进而获得高生产率是困难的。研究表明, 随着板厚的增加, 缝焊焊接速度必须减慢。

(5) 滚轮电极端面尺寸 H 或 R 滚轮电极端面是缝焊时与焊件表面相接触的部分。其中, H 为 F 型 (扁平形)、SB 型 (单倒角形)、PB 型 (双倒角形) 滚轮电极工作端面宽度, R 为 (R 型球面形) 滚轮电极球面半径, 如图 2-2-33 所示。

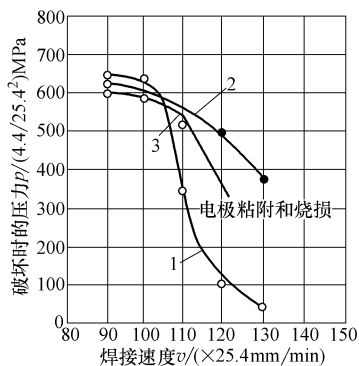


图 2-2-32 焊接速度对缝焊接头强度的影响

(10 钢、 $\delta=2mm$ 、 $t=2cyc$ 、

$t_0=1cyc$ 、 $F_w=6672N$)

1—23750A 2—25200A 3—26800A

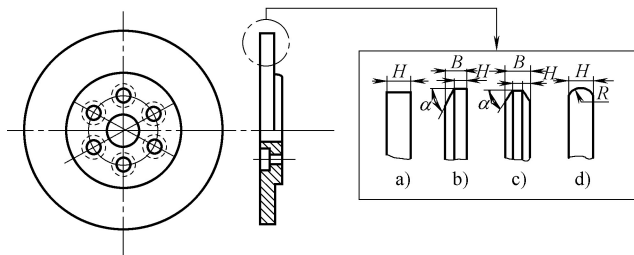


图 2-2-33 常用滚轮电极形式

a) F 型 (扁平形) b) SB 型 (单倒角形)

c) PB 型 (双倒角形) d) R 型 (球面形)

滚轮电极 D 一般在 $50 \sim 600mm$, 常用尺寸是 $D=180 \sim 250mm$; 滚轮电极端面尺寸 $H \leq 20mm$, $R=25 \sim 200mm$ 。为提高滚轮电极的散热效果、减小电极粘损倾向, 在焊件结构尺寸允许条件下, 滚轮电极直径应尽可能大。经验指出, 上滚轮电极直径最好能做到 $D \geq 250mm$, 使用后不小

于 150mm。

滚轮电极端面尺寸的变化对接头质量的影响与点焊时电极头端面尺寸的影响相似，由于缝焊的加热特点使这种影响比点焊时更为严重。因此，对端面尺寸变化的限制比点焊时更为严格，即在使用中规定，端面尺寸的变化 $\Delta H < 10\% H$ 、 $\Delta R < 15\% R$ ，修整最好用专用工具或在车床上进行。

由于对缝焊接头质量要求主要体现在接头应具有良好的密封性和耐蚀性上，因此在对上述各参数讨论时强调了它们对焊透率和重叠量的影响。同时，在每讨论一个参数时均假定其他参数不变，而实际上参数间是相互影响的，必须予以适当配合、调整才能获得优质的缝焊接头，这往往由一些曲线图、规范尺寸和焊接参数表总结出来，实际使用时再通过工艺试验予以确定。

缝焊焊接参数参见 2.3.2 中各金属材料缝焊时焊接参数表。.

2.3.2 常用金属材料的缝焊

金属材料的缝焊焊接性比其点焊焊接性差，其原因主要是缝焊过程及规范参数复杂、机械（力）作用不充分，以及缝焊接头的密封性和耐蚀性要求使其对缺陷的敏感性增大。但是，缝焊接头仍然是在热—机械（力）联合作用下形成的，这就使缝焊与点焊并无实质上的不同。一般认为，判断金属材料点焊焊接性的主要标志对缝焊也是适用的；金属材料点焊焊接性指标及对规范参数的一般要求、各金属材料的点焊技术要点均可作为缝焊时的主要参考。

表 2-2-31 ~ 表 2-2-35 列出了各常用金属材料（含异种材料）缝焊焊接参数表，供实际应用中参考。

表 2-2-31 低碳钢缝焊的焊接参数（气密性接头）

板厚 /mm	滚轮尺寸/mm			电极压力 /kN		最小搭接 量/mm		高速焊接				中速焊接				低速焊接			
	最小 <i>b</i>	标准 <i>b</i>	最大 <i>B</i>	最小	标准	最小 <i>b</i>	标准 <i>b</i>	焊接 时间 /周	休止 时间 /周	焊接 电流 /kA	焊接速 度/(cm /min)	焊接 时间 /周	休止 时间 /周	焊接 电流 /kA	焊接速 度/(cm /min)	焊接 时间 /周	休止 时间 /周	焊接 电流 /kA	焊接速 度/(cm /min)
0.4	3.7	5.3	11	2.0	2.2	7	10	2	1	12.0	280	2	2	9.5	200	3	3	8.5	120
0.6	4.2	5.9	12	2.2	2.8	8	11	2	1	13.5	270	2	2	11.5	190	3	3	10.0	110
0.8	4.7	6.5	13	2.5	3.3	9	12	2	1	15.5	260	3	2	13.0	180	2	4	11.5	110
1.0	5.1	7.1	14	2.8	4.0	10	13	2	2	18.0	250	3	3	14.5	180	2	4	13.0	100
1.2	5.4	7.7	14	3.0	4.7	11	14	2	2	19.0	240	4	3	16.0	170	3	4	14.0	90
1.6	6.0	8.8	16	3.6	6.0	12	16	3	1	21.0	230	5	4	18.0	150	4	4	15.5	80
2.0	6.6	10.0	17	4.1	7.2	13	17	3	1	22.0	220	5	5	19.0	140	6	6	16.5	70
2.3	7.0	11.0	17	4.5	8.0	14	19	4	2	23.0	210	7	6	20.0	130	6	6	17.0	70
3.2	8.0	13.6	20	5.7	10	16	20	4	2	27.5	170	11	7	22.0	110	6	6	20.0	60

注：*b* 为滚盘接触面宽度，*B* 为滚盘厚度。滚轮直径为 150 ~ 200mm。

表 2-2-32 各种镀锌钢板缝焊的焊接参数

镀层种数 及厚度	板厚/mm	滚轮宽度/mm	电极压力/kN	时间/周		焊接电流/kA	焊接速度/ (cm/min)
				焊接	休止		
热镀锌钢板 (15 ~ 20μm)	0.6	4.5	3.7	3	2	16	250
	0.8	5.0	4.0	3	2	17	250
	1.0	5.0	4.3	3	2	18	250
	1.2	5.5	4.5	4	2	19	230
	1.6	6.5	5.0	4	1	21	200
电镀锌钢板 (2 ~ 3μm)	0.6	4.5	3.5	3	2	15	250
	0.8	5.0	3.7	3	2	16	250
	1.0	5.0	4.0	3	2	17	250
	1.2	5.5	4.3	4	2	18	230
	1.6	6.5	4.5	4	1	19	200

(续)

镀层种数 及厚度	板厚/mm	滚轮宽度/mm	电极压力/kN	时间/周		焊接电流/kA	焊接速度/ (cm/min)
				焊接	休止		
磷酸盐处理 防锈钢板	0.6	4.5	3.7	3	2	14	250
	0.8	5.0	4.0	3	2	15	250
	1.0	5.0	4.5	3	2	16	250
	1.2	5.5	5.0	4	2	17	230
	1.6	6.5	5.5	4	1	18	200

表 2-2-33 不锈钢 (1Cr18Ni9Ti^①) 缝焊的焊接参数

板厚/mm	滚轮宽度/mm	电极压力/kN	时间/周		焊接电流/kA	焊接速度 /(cm/min)
			焊接	休止		
0.3	3~3.5	2.5~3.0	1~2	1~2	4.5~5.5	100~150
0.5	4.5~5.5	3.4~3.8	1~3	2~3	6.0~7.0	80~120
0.8	5.0~6.0	4.0~5.0	2~5	3~4	7.0~8.0	60~80
1.0	5.5~6.5	5.0~6.0	4~5	3~4	8.0~9.0	60~70
1.2	6.5~7.5	5.5~6.2	4~6	3~5	8.5~10	50~60
1.5	7.0~8.0	6.0~7.2	5~7	5~7	9.0~12	40~60
2.0	7.5~8.5	7.0~8.0	7~8	6~9	10~13	40~50

① 旧标准牌号, 后同。

表 2-2-34 铝合金直流冲击波步进缝焊的焊接参数

板厚/mm	滚轮圆弧 半径/mm	步距(点 距)/mm	3A21、5A03、5A06				2A12-T4、7A04-T6			
			电极压 力/kN	焊接时 间/周	焊接电 流/kA	每分钟 点数	电极压 力/kN	焊接时 间/周	焊接电 流/kA	每分钟 点数
1.0	100	2.5	3.5	3	49.6	120~150	5.5	4	48	120~150
1.5	100	2.5	4.2	5	49.6	120~150	8.5	6	48	100~120
2.0	150	3.8	5.5	6	51.4	100~120	9.0	6	51.4	80~100
3.0	150	4.2	7.0	8	60.0	60~80	10	7	51.4	60~80
3.5	150	4.2	—	—	—	—	10	8	51.4	60~80

表 2-2-35 常见异种不锈钢缝焊焊接参数

钢号	厚度/mm	焊前状态	滚轮宽度		焊 接 参 数					熔核直 径/mm
			上	下	焊接电流 I/A	通电时 间 t/s	步距 /mm	焊接速度 v /(点/min)	总压力/N	
Cr17Ni2 + 1Cr18Ni9Ti ^①	1.5 + 1.0	Cr17Ni2 淬 火回火， 1Cr18 Ni9Ti 淬火	6.5 + 0.5	7.5 + 0.5	7500 ~ 8500	0.16	—	300 ~400	7500 ~ 8000	5.0
1Cr19Ni11Si4AlTi + 1Cr18Ni9Ti ^①	0.4 + 0.3	冷作硬化， 机械抛光	6.0	6.0	脉冲电流	0.04	1.5	310	3500	4.2 ~4.3
	0.4 + 0.4					0.04		310	3500 ~4000	3.3 ~4.0
	0.8 + 0.3					0.06		310	3500 ~4000	4.4 ~5.0
	0.8 + 0.4					0.06			3500 ~4000	4.4 ~5.0
	0.8 + 0.8					0.06			3500 ~4000	3.8 ~4.6
	0.8 + 1.2					0.06			5300	4.0 ~4.1
						1Cr18Ni9Ti + 21 - 11 - 2.5 铸造不锈钢			1.0 + 1.5	正火
1.0 + 2.0	4.0 ~ 5.0	4.0 ~ 6.0	7000 ~ 7200	0.14	6200	4.4				

① 此表的不锈钢牌号均为旧标准牌号, 新标准无对应牌号。

2.4 对焊

对焊 (Butt Resistance Welding) 是指把两工件端部相对放置, 利用焊接电流加热, 然后加压完成焊接的电阻焊方法。包括电阻对焊及闪光对焊两种。

对焊主要用于型材的接长 (钢轨等)、闭合零件的拼口 (轮圈等)、异种金属对焊 (刀具等)、部件的组焊 (后桥壳体等), 由于生产率高、质量可靠、易于实现自动化, 因而获得广泛应用, 如图 2-2-34 所示。目前, 电阻对焊可焊接 250mm^2 截面下金属型材, 连续闪光对焊主要用于截面 1000mm^2 左右闭合零件的拼口, 预热闪光对焊可焊接 $5000 \sim 10000\text{mm}^2$ 大型截面黑色金属零件, 新发展的脉冲闪光对焊已可焊接 100000mm^2 截面的输气管道。

2.4.1 闪光对焊

闪光对焊 (Flash Butt Welding, FBW) 是指将工件装配成对接接头, 接通焊接电源, 并使其端面逐渐移近达到局部接触, 利用电阻热加热这些接触点 (产生闪光), 使端面金属熔化, 直至端面在一定深度范围内达到预定温度时, 迅速施加顶锻力完成焊接的方法。闪光对焊又可分为连续闪光对焊和预热闪光对焊。

1. 闪光对焊基本原理

(1) 闪光对焊接头的形成 闪光对焊的原理和接头形成如图 2-2-35 所示。可简述为, 将焊件 1 夹紧于夹钳电极 2 中, 接通阻焊变压器 3, 移动夹钳并使两工件端面轻微接触, 形成许多接触点。电流通过时, 接触点熔化, 成为连接两端面的液体金属过梁。由于过梁中的电流密度极高, 使过梁中的液体金属蒸发, 过梁爆破。随着动夹钳的缓慢推进, 过梁也不断产生与爆破。在蒸汽压力和电磁力的作用下, 液态金属微粒不断地从对口间喷射出来, 形成火花急流——闪光。在此过程中工件逐渐缩短, 端头温度也逐渐升高, 过梁的爆破速度将加快, 动夹钳的推进速度也必须逐渐加大。在

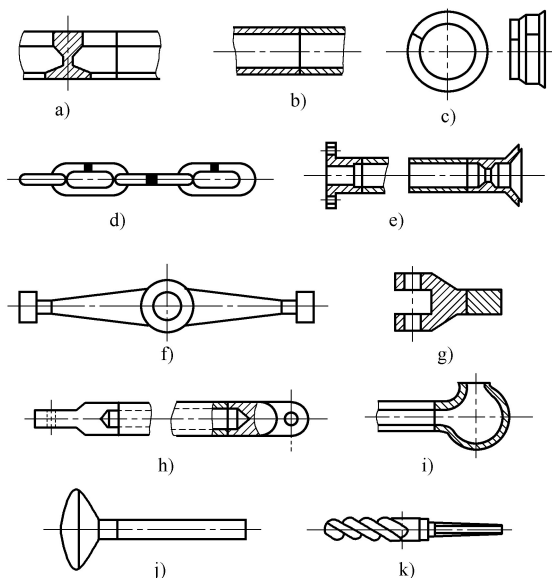


图 2-2-34 对焊应用举例

- a) 钢轨 b) 管道 c) 汽车轮辋 d) 链环
e) 万向轴壳 f) 汽车后桥壳体 g) 连杆
h) 拉杆 i) 特殊形状零件 j) 排气阀 k) 刀具

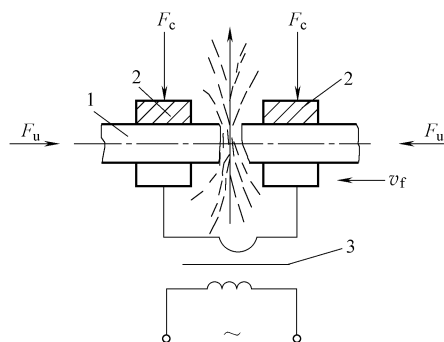


图 2-2-35 闪光对焊原理

- 1—焊件 2—夹钳电极 3—阻焊变压器
 F_c —夹紧力 F_u —顶锻力 v_f —闪光速度

闪光过程结束前必须使整个端面形成一层液态金属层,并在一定深度上使金属达到塑性变形温度。此时,动夹钳突然加速,对工件施加足够的顶锻力,对口间隙迅速减小,过梁停止爆破,随即切断电源,封闭工件端面的间隙和过梁爆破后留下的火口。同时,挤出端面的液态金属及氧化夹杂,使洁净的塑性金属紧密接触,并使接头区产生一定的塑性变形,以促进再结晶的进行,形成共同晶粒,获得牢固的接头。闪光对焊时,在加热过程中虽有熔化金属,但实质上是塑性状态下的固相焊接。

(2) 闪光对焊的热源及加热特点 闪光对焊时的热源是焊接区析出的电阻热。由于夹钳电极对焊件的夹紧力很大,所以电极与焊件间接触电阻很小。同时,该电阻又远离接合面,其析热对加热过程所起的作用很小,可忽略不计。故

$$Q = \int_0^t i^2 (r_c + 2r_w) dt \quad (2-2-5)$$

焊件内部电阻 $2r_w$ 可由下式确定:

$$2r_w = m\rho_r \frac{2l}{S} \quad (2-2-6)$$

式中 m ——趋肤效应系数;

ρ_r ——焊接区金属的电阻率,是温度的函数,单位为 $\Omega \cdot \text{mm}$;

l ——焊件的调伸长度,单位为 mm ;

S ——焊件的截面积,单位为 mm^2 。

接触电阻 r_c 即为两焊件端面间液体金属过梁的总电阻,其大小取决于同时存在的过梁数目、其横截面面积以及各过梁上电流线收缩所引起的电阻增加,可由下面经验公式确定:

$$r_c = \frac{9500k}{S^{2/3} v_t^{1/3} j} \times 10^{-6} \quad (2-2-7)$$

式中 k ——考虑钢材性质的系数,对于碳钢、低合金钢, $k = 1$; 对于奥氏体钢, $k = 1.1$;

S ——焊件的截面积,单位为 cm^2 ;

v_t ——闪光速度,单位为 cm/s ;

j ——电流密度,单位为 A/mm^2 。

闪光对焊时动态电阻的变化规律如图 2-2-36 所示。接触电阻 r_c 较大并在闪光过程中始终存在,随着闪光过程的进行,零件的接近速度加大、过梁数目和横截面积增大,导致 r_c 减小;焊件内部电阻 $2r_w$ 由于闪光时的加热而增大,但始终小于 r_c 。同时,由于 r_c 的降低超过 $2r_w$ 的增加,故总电阻 r 呈下降趋势。顶锻开始时由于两零件端面相互接触,液态过梁突然消失,因而 r 急剧下降,以后的变化规律同于 $2r_w$ 。由于电阻的上述特点,闪光对焊时接触电阻 r_c 对加热起主要作用,其产生的热量占总析出热量的 85% ~ 90%。

焊接区的温度分布是析热与散热的综合结果,闪光对焊的温度分布如图 2-2-37 所示。闪光过程中焊件逐层地被熔化,对口及邻近区域温度升高,曲线 A 表示对口端面的温度变化规律;曲线族 B 表示不同熔化量时沿焊件长度获得的温度分布。应该注意,当闪光进行到 $\Delta f'$ 时沿焊件长度的温度场进入准稳态,理论上讲此时即可转入顶锻阶段,但考虑到毛坯加热的不均匀性及端面下料误差等因素,实际焊接中还应将闪光继续进行,达到工艺上所要求的闪光留量 Δf (Δf 应比 $\Delta f'$ 大 50% ~ 100%); 预热闪光对焊,在连续闪光之前先进行预热,然后再进行闪光和顶锻。通过预热提高了焊件端面温度,减小温度梯度并使闪光很快进入准稳态 ($\Delta f'' < \Delta f'$),加热终了时其温度分布比较平缓。

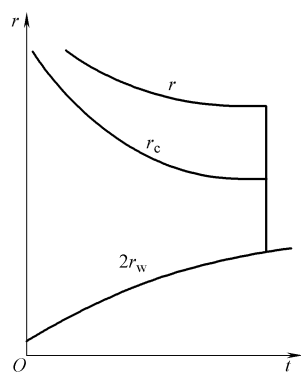


图 2-2-36 闪光对焊时电阻 r_c 、 $2r_w$ 、 r 的变化

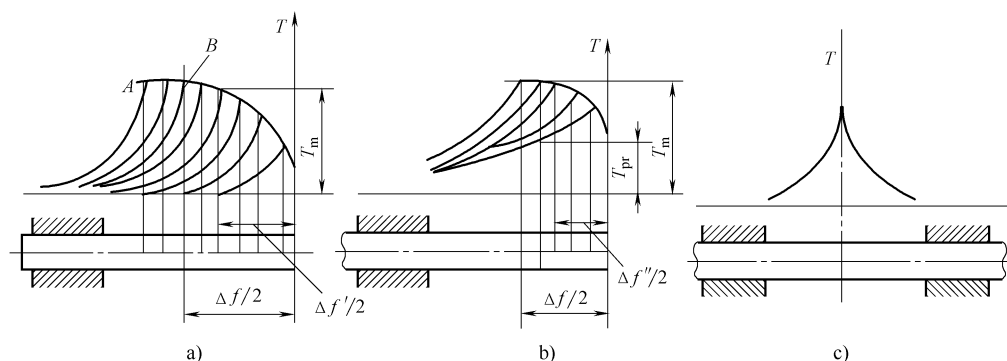


图 2-2-37 闪光进行时沿焊件的温度分布

a) 连续闪光对焊 b) 预热闪光对焊 c) 连续闪光终了时的温度分布
 Δf —闪光留量 $\Delta f'$ 、 $\Delta f''$ —刚到达准稳态时的闪光留量 T_{pr} —预热温度

2. 闪光对焊一般工艺

(1) 闪光对焊焊接循环 连续闪光对焊焊接循环由闪光、顶锻、保持、休止等程度组成（见图 2-2-38a），其中闪光、顶锻两个连续阶段组成连续闪光对焊接头形成过程，而保持、休止等程序则是对焊操作中所必需的。预热闪光对焊，是在上述焊接循环中增设有预热程序（或预热阶段）。预热方法有电阻预热和闪光预热两种，图 2-2-38b 是电阻预热的闪光对焊焊接循环。

闪光对焊时，为获得优质接头，应做到以下方面：

1) 闪光阶段结束时：对口处金属尽量不被氧化，这就要求闪光应进行得稳定而又激烈，尤其应控制好从闪光后期至顶锻开始瞬间，闪光不能中断和应有更高频率的过梁爆破。同时，也应控制好闪光过程中工件不应产生短路，否则将使端面局部过热；在对口及其附近区域获得一合适的温度分布，即沿对口端面加热均匀。沿零件长度获得合适的温度分布。端面上有一层较厚的液态金属层。

2) 顶锻阶段结束时：应使对口及其邻近区域获得适当的塑性变形，该变形量将使闪光阶段氧化的金属尽量排挤到飞边中去，并促进焊缝再结晶过程。

3) 预热阶段结束时：沿整个焊件端面（尤其是展开形焊件，例如板材等）得到均匀的预热，并达到所需的温度值（例如，对于钢为 1073 ~ 1173K）。

(2) 闪光对焊焊接参数及选择 闪光对焊焊接参数选择适当时，可以获得几乎与母材等性能的优质接头。主要焊接参数有调伸长度、闪光留量、闪光速度、闪光电流密度（属闪光阶段）；顶锻留量、顶锻速度、顶锻力、夹紧力（属顶锻阶段）；预热温度、预热时间（属预热阶段）等。

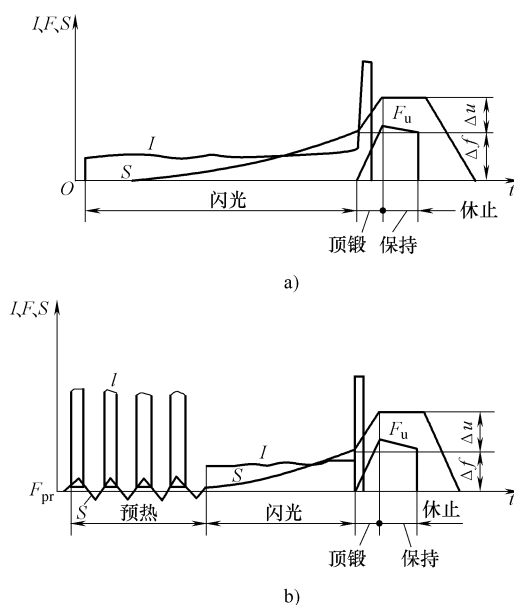


图 2-2-38 闪光对焊焊接循环

a) 连续闪光对焊 b) 预热闪光对焊（电阻预热）

I —电流 F —压力 S —行程（位移）

F_{pr} —预压力 F_u —顶锻力

1) 调伸长度 l : 焊件从静夹具或活动夹具中伸出的长度, 又称调置长度。它的作用是保证必要的留量 (焊件缩短量) 和调节加热时的温度场, 可根据焊件断面和材料性质选择:

① $l = (0.7 \sim 1.0) d$ (d 为圆材直径或方材边长)。

② $l = (4 \sim 5) \delta$ (δ 为板材厚度, $\delta = 1 \sim 4\text{mm}$)。

③ 异种材料闪光对焊时 l 的选择参考表 2-2-36。

表 2-2-36 异种材料对焊时 l 的选择

材料		l	
左	右	左	右
低碳钢	奥氏体钢	$1.2d$	$0.5d$
中碳钢	高速钢	$0.75d$	$0.5d$
钢	黄铜	$1.5d$	$1.5d$
钢	铜	$2.5d$	$1.0d$

2) 闪光留量 Δf : 闪光对焊时, 考虑焊件因闪光而减短的预留长度, 又称烧化留量。它是一重要的加热参数, 可使沿焊件长度获得合适的温度分布 (见图 2-2-37), 应根据材料性质、焊件截面尺寸和是否采取预热等因素来选择。通常, Δf 占总留量的 70% ~ 80%, Δu 为顶锻留量; 预热闪光焊时 Δf 可缩短到总留量的 1/3 ~ 1/2。

3) 闪光速度 v_f : 在稳定闪光条件下, 零件的瞬时接近速度即动夹具的瞬时进给速度, 又称烧化速度。它是一加热参数, 只要按事先给定的动夹具位移曲线 S 变化, 即可获得最佳加热效果。 S 应为

$$S = K_f t^b \quad (2-2-8)$$

式中 K_f ——系数, 低碳钢为 0.5 ~ 1.5, 高合金钢多为 2.5 ~ 3.0;

t ——闪光时间;

b ——指数, 低碳钢为 2.0, 高合金钢为 2.5。

低碳钢连续闪光对焊时, 平均闪光速度为 0.8 ~ 1.5mm/s, 顶锻前闪光速度为 4 ~ 5mm/s。预热闪光对焊时, 平均闪光速度为 1.5 ~ 2.5mm/s。

4) 闪光电流密度 j_f (或二次侧空载电压 U_{20}) j_f (或 U_{20}) 对加热有重大影响, 在实际生产中是通过调节 U_{20} 来实现的, U_{20} 一般在 1.5 ~ 14V 之间。其选择原则应是保证稳定闪光条件下尽量选用较低的 U_{20} 。同时, j_f 的选择又与焊接方法、材料性质和焊件截面尺寸等有关, 例如, 连续闪光对焊, 导电导热性良好的材料, 展开形截面的焊件, j_f 应取高值; 预热闪光对焊, 大截面焊件, j_f 应取低值; 预热闪光对焊, 大截面焊件, j_f 应取高值; 预热闪光对焊大截面焊件, j_f 应取低值, 见表 2-2-37。

表 2-2-37 闪光和顶锻时电流密度的参考值 (单位: A/mm²)

零件	材料	闪 光 时		顶 锻 时
		平 均 值	最 大 值	
在高生产率情况下				
厚度 2 ~ 6mm 的 板材和管材,直径 6 ~ 30mm 的棒材	低碳钢	10 ~ 15	15 ~ 20	40 ~ 60
	铬 钢	15 ~ 20	20 ~ 25	35 ~ 55
	铝合金	20 ~ 35	25 ~ 45	130 ~ 170
	铜合金	25 ~ 40	30 ~ 50	200 ~ 300
在 额 定 功 率 情 况 下				
板材、管材、棒材	低碳钢	2 ~ 4	6 ~ 8	20 ~ 25
	铬 钢	6 ~ 8	12 ~ 15	40 ~ 50
	铝合金	5 ~ 12	10 ~ 20	60 ~ 80
	铜合金	15 ~ 20	15 ~ 25	100 ~ 200

5) 顶锻留量 Δu : 闪光对焊时, 考虑两焊件因顶锻缩短而预留的长度称顶锻留量。它影响液态金属、氧化物的排出及塑性变形程度, 通常 Δu 略大些有利, 可根据材料性质、焊件截面尺寸等因素来选择。通常, Δu 占总留量的 20% ~ 30%, 其中有电顶锻量约为无电顶锻量的 0.5 ~ 1.0 倍; 焊铝合金时 Δu 值比焊同截面尺寸钢时约大 50%。同时, 小截面或薄壁铝件焊接时, 为避免过热还应限制其有电顶锻时间不应超过 0.06s。

6) 顶锻速度 v_u : 闪光对焊时, 顶锻阶段动夹具的移动速度称顶锻速度, 它是获得优质接头的重要参数。通常 v_u 略大些有利, 因为足够高的 v_u 能迅速封闭对口端面间隙、减少金属氧化, 在高速状态下可较容易地排除液态金属和氧化夹杂, 使纯净的端面金属紧密贴合, 促进交互结晶。如果 v_u 较小, 不仅使闭合间隙和塑性变形所需时间增长, 而且由于对口金属温度早已降低, 导致去除和破坏氧化膜变得困难。 v_u 的最小平均值: 对低碳钢为 60 ~ 80mm/s; 对高合金钢为 80 ~ 100mm/s; 对铝合金为 150 ~ 200mm/s; 对铜为 200 ~ 300mm/s。当采用强迫变形模式时, v_u 可降低。

随着顶锻速度增加, 铝合金对焊接头的塑性显著提高 (见图 2-2-39)。当 v_u 足够高时获得的优质接头宏观组织形貌如图 2-2-40 所示。同时, 随着顶锻速度增加, 顶锻压力 p_u 也可降低。

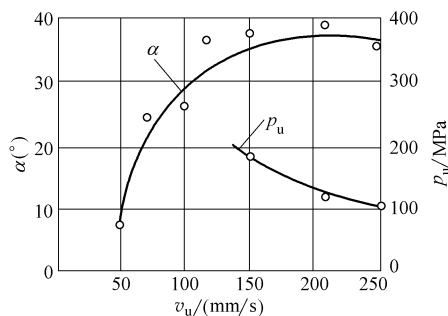


图 2-2-39 铝合金接头弯曲角 α 与顶锻速度 v_u 的关系



图 2-2-40 铝合金优质接头宏观组织形貌 (金属纤维流线形态)

7) 顶锻力 F_u : 闪光对焊时, 顶锻阶段施加给焊件端面上的力, 常用单位面积上压力 p_u 来表示。它主要影响对口塑性变形程度, 且为一从属参数, 但其过大或过小均会使接头冲击韧性明显降低。 p_u 的大小与顶锻速度 v_u 有关 (见图 2-2-39)。表 2-2-38 列出了各种材料顶锻压力 p_u 的参数值。

8) 夹紧力 F_c : F_c 是防止焊件在夹钳电极中打滑而施加的力。它与顶锻力 F_u 及焊机结构有关, 当焊机为有顶座结构时, F_c 可大为降低。如果焊机为无顶座结构, 此时夹紧力应为

$$F_c \geq K_c F_u \quad (2-2-9)$$

式中 K_c ——夹紧系数 (0.8 ~ 4.0)。

夹紧系数 K_c 与电极、焊件材料及其表面状态、顶锻模式等有关。例如, NiCu 电极焊热轧钢板 $K_c = 2.3$, 焊酸洗钢板 K_c 应提高 15%; 焊铝合金自由成形 $K_c = 2.7$, 而强迫成形并切除毛刺时 $K_c = 1.7$ 。

9) 预热温度 T_{pr} : T_{pr} 与材料性质、焊件断面尺寸等因素有关。 T_{pr} 过高, 会使接头韧性、塑性降低; T_{pr} 太低, 会使闪光困难、加热区变窄而不利顶锻塑性变形。低碳钢的预热温度 $T_{pr} \approx 1073 \sim 1173\text{K}$, 而在对焊大截面 ($10000 \sim 20000\text{mm}^2$) 厚壁管时, 预热温度可适当提高 $T_{pr} \approx 1373 \sim 1473\text{K}$ 。

10) 预热时间 t_{pr} : t_{pr} 与材料性质、焊件截面尺寸、焊机功率等因素有关, 其取值大小所带来的影响与预热温度 T_{pr} 相似。

表 2-2-38 各种材料闪光对焊顶锻压力参考值

材料	p_u/MPa			材料	p_u/MPa		
	连续闪光		预热闪光		连续闪光		预热闪光
	生产规范值	额定值			生产规范值	额定值	
低碳钢	90 ~ 100	50 ~ 80	40 ~ 60	奥氏体钢	150 ~ 220	120 ~ 200	100 ~ 140
中碳钢	100 ~ 110	60 ~ 90	40 ~ 60	铜	250 ~ 400	—	—
高碳钢	110 ~ 120	70 ~ 100	40 ~ 60	钛	30 ~ 60	—	30 ~ 40
铸 铁	80 ~ 100	60 ~ 80	40 ~ 60	黄 铜	140 ~ 250	—	—
低合金钢	100 ~ 110	50 ~ 100	40 ~ 60	青 铜	140 ~ 250	—	—
铁素体钢	100 ~ 180	80 ~ 150	60 ~ 80	—	—	—	—

综上所述，闪光对焊焊接参数的选择应从技术条件出发，结合焊件材料性质、截面形状及尺寸、设备条件和生产规模等因素综合考虑。一般可先确定工艺方法，然后参照推荐的有关数据及试验资料初步选定焊接参数，最后由工艺试验并结合接头性能分析予以确定。

(3) 工件准备 闪光对焊的工件准备包括：端面几何形状、毛坯端头的加工和表面清理。

闪光对焊时，两工件对接面的几何形状和尺寸应基本一致（见图 2-2-41），圆形工件直径不超过 15%，方形工件和管形工件尺寸差不超过 10%。工件断面大时，可将其中一个工件端部倒角，使电流密度增大，易于激发闪光，使之可不用预热或可不必提高闪光初期二次电压的工艺要求，图 2-2-42 是推荐的棒、管、板材的倒角尺寸。

闪光对焊对端面的清理要求不严，但与夹钳电极接触表面应严格清理，清理方法可为砂轮、钢丝刷等机械清理，也可以用酸洗。

焊前对焊夹钳电极的正确选用和焊接过程中维护修理，也是一个重要条件，可参阅第 2 篇 2.5.3 节的相关内容。

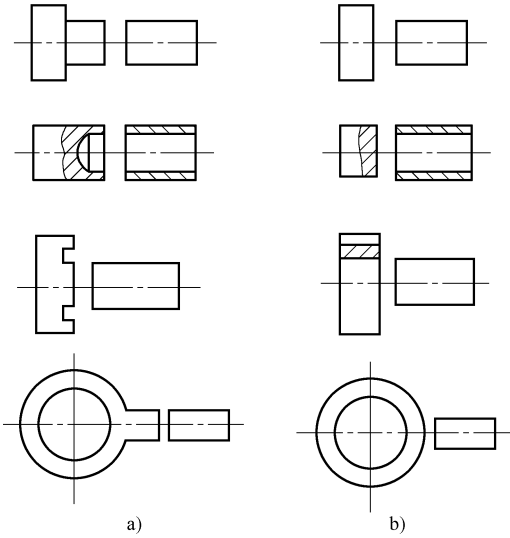


图 2-2-41 闪光对焊的接头形式
a) 合理 b) 不合理

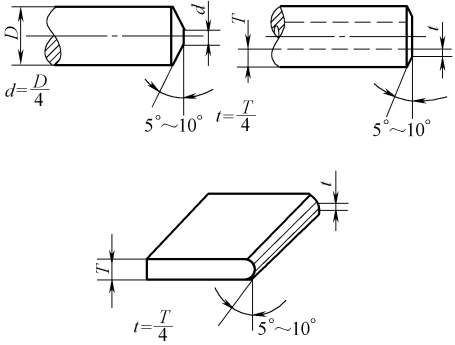


图 2-2-42 大断面工件端部的倒角尺寸

3. 常用金属材料的闪光对焊

判断金属材料闪光对焊焊接性的主要标志如下：

- ① 电导率小而热导率大的金属材料，其焊接性较差。
- ② 高温屈服强度大的金属材料，其焊接性较差。
- ③ 对热循环较敏感，即易生成与热循环作用有关缺陷（淬硬、裂纹、软化和氧化夹杂等）的

材料，其焊接性较差。

④ 液-固相线温度区间宽的材料，其焊接性较差。因为结晶温度区间宽使半熔化区增大，即液体金属层下固相表面不平度大，需要较大的 F_u 和 Δu ，否则对口中易残留凝固组织、缩松和裂纹。

⑤ 对口端面生成高熔点氧化物的材料，其焊接性较差，这些氧化物主要是 Cr、Al 的氧化物。当然，评定某一金属材料闪光对焊焊接时，应综合、全面地考虑以上诸因素。

(1) 低碳钢的闪光对焊 低碳钢闪光对焊焊接性良好。对焊接头中会存在不同程度的过热，产生的魏氏组织将使接头塑性有所降低，但在一般使用条件下是允许的；严重过热时，可通过常化或退火处理消除。焊接参数不当时会在接头中产生过烧，这是低碳钢对焊时应予避免的缺陷，因为它使接头塑性急剧降低，而且又无法通过焊后热处理来改善。低碳钢板材闪光对焊接头中有时会有片状或棒状的氧化物夹杂。管材闪光对焊接头中氧化物夹杂常呈大面积的覆盖层。氧化物夹杂虽然对接头强度无显著影响，但却使塑性指标显著降低，调整焊接参数会使氧化物夹杂减少，甚至消除。

低碳钢闪光对焊的主要焊接参数见表 2-2-39。

表 2-2-39 各类钢闪光对焊主要焊接参数

类别	平均闪光速度/(mm/s)		最大闪光速度/(mm/s)	顶锻速度/(mm/s)	顶锻压强/MPa		焊后热处理
	预热闪光	连续闪光			预热闪光	连续闪光	
低碳钢	1.5~2.5	0.8~1.5	4~5	15~30	40~60	60~80	不需要
低碳钢及低合金钢	1.5~2.5	0.8~1.5	4~5	≥30	40~60	100~110	缓冷,回火
高碳钢	≤1.5	≤0.8	4~5	15~30	40~60	110~120	缓冷,回火
珠光体高合金钢	3.5~4.5	2.5~3.5	5~10	30~150	60~80	110~180	回火,正火
奥氏体钢	3.5~4.5	2.5~3.5	5~8	50~160	100~140	150~220	一般不需要

(2) 可淬硬钢的闪光对焊 可淬硬钢闪光对焊焊接性较差，可分为以下两种情况。

- 1) 中碳钢和高碳钢：这类可淬硬钢闪光对焊焊接性稍好，因为氧化物 FeO 熔点低于母材，顶锻时易被排出等。但在对焊接头中会出现白带（贫碳层）而使对口软化，在采用长时间热处理后可改善或消除脱碳区。
- 2) 合金钢：这类可淬硬钢闪光对焊焊接性较差，随着合金元素含量的增加使淬硬倾向增大，难熔氧化物夹杂增加；另外，高温强度大，结晶温度区间宽，将使塑性下变形困难和易于生成疏松等。

可淬硬钢常采用预热闪光对焊，并应提高闪光速度和顶锻速度，焊后进行局部或整体热处理。

可淬硬钢闪光对焊的主要焊接参数见表 2-2-39。

(3) 铝合金的闪光对焊 铝及其合金由于具有导电导热性好、易氧化和氧化物（ Al_2O_3 ）熔点高等特点，闪光对焊焊接性较差。在焊接参数不当时，接头中易形成氧化物夹杂、残留铸态组织、疏松和层状撕裂等缺陷，将使接头塑性急剧降低。一般来说，冷作强化型铝合金、退火态的热处理强化型铝合金，闪光对焊焊接性稍好；而淬火态热处理强化铝合金，焊接性则较差，必须采用较高的闪光速度和强迫成形的顶锻模式（见图 2-2-43），并且焊后要进行淬火和时效处理。铝合金推荐选用矩形波电源闪光对焊。

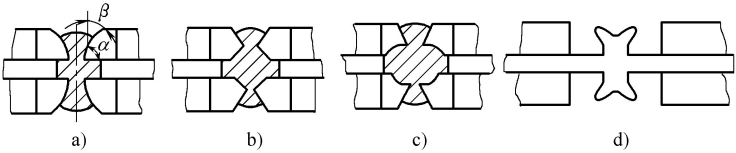


图 2-2-43 顶锻模式示意图

a)、b)、c) 对口强迫成形顶锻 d) 对口自由顶锻

铝及铝合金闪光对焊的主要焊接参数见表 2-2-40。

闪光焊还可以焊接奥氏体钢（见表 2-2-39）、铜及铜合金（见表 2-2-40）、异种材料（铜-铝见表 2-2-41、碳钢-工具钢见表 2-2-42）、钛合金等几乎所有金属材料。但应注意，要获得闪光对焊优质接头除正确选用对焊机、优化焊接参数外，有时还要采取必要的工艺措施，这里不再赘述。

表 2-2-40 有色金属及其合金闪光对焊的焊接参数

工艺参数	材料尺寸/mm															
	铜			黄铜				青铜(QSn 6.5-1.5) 带材厚		铝				铝合金		
				H62		H59										
	棒材 $d=10$	管材 9.5×1.5	板材 44.5×10	棒材直径						棒材直径				2A50		5A06
								板材厚度						板材厚度		
				6.5	10	6.5	10	1~4	4~8	20	25	30	38	4	6	4~7
空载电压/V	6.1	5.0	10.0	2.17	4.41	2.4	7.5	—	—	—	—	—	—	6	7.5	10
最大电流/kA	33	20	60	12.5	24.3	13.5	41	—	—	58	63	63	63	—	—	—
伸出长度/mm	20	20	—	15	22	18	25	25	40	38	43	50	65	12	14	13
闪光留量/mm	12	—	—	6	8	7	10	15	25	17	20	22	28	8	10	14
闪光时间/s	1.5	—	—	2.5	3.5	2.0	2.2	3	10	1.7	1.9	2.8	5.0	1.2	1.5	5.0
平均闪光速度/(mm/s)	8.0	—	—	2.4	2.3	3.5	4.5	5	2.5	11.3	10.5	7.9	5.6	5.8	6.5	2.8
最大闪光速度/(mm/s)	—	—	—	—	—	—	—	12	6	—	—	—	—	15.0	15.0	6.0
顶锻留量/mm	8	—	—	9	13	10	12	—	—	13	13	14	15	7.0	8.5	12.0
顶锻速度/(mm/s)	200	—	—	200~300	200~300	200~300	200~300	125	125	150	150	150	150	150	150	200
顶锻压力/MPa	380	290	224	—	230	—	250	—	60~150	64	170	190	120	180~200	200~220	130
有电流顶锻量/mm	6	—	—	—	—	—	—	—	—	6.0	6.0	7.0	7.0	3.0	3.0	6~8
比功率/(kVA/mm ²)	2.6	2.66	1.35	0.9	1.35	0.95	2.7	0.5	0.25	—	—	—	—	0.4	0.4	—

表 2-2-41 铜与铝闪光对焊的焊接参数

焊接参数		焊接断面/mm ²			
		棒材直径		带材	
		20	25	40×50	50×10
电流最大值/kA		63	63	58	63
伸出长度	铝	3	4	3	4
	铜	34	38	30	36
烧化留量/mm		17	20	18	20
闪光时间/s		1.5	1.9	1.6	1.9
闪光平均速度/(mm/s)		11.3	10.5	11.3	10.5
顶锻留量/mm		13	13	6	8
顶锻速度/(mm/s)		100~120	100~120	100~120	100~120
顶锻压强/MPa		190	270	225	268

表 2-2-42 刀具对焊的焊接参数

直径/mm	面积/mm ²	二次空载 电压/V	伸出长度/mm		留量/mm						
			工具钢	碳钢	预热	闪光	顶锻		总留量	工具钢留量	碳钢留量
							有电	无电			
8~10	50~80	3.8~4	10	15	1	2	0.5	1.5	5	3	2
11~15	80~180	3.8~4	12	20	1.5	2.5	0.5	1.5	6	3.5	2.5
16~20	200~315	4~4.3	15	20	1.5	2.5	0.5	1.5	6	3.5	2.5
21~22	250~380	4~4.3	15	20	1.5	2.5	0.5	1.5	6	3.5	2.5
23~24	415~450	4~4.3	18	27	2	2.5	0.5	2	7	4	3
25~30	490~700	4.3~4.5	18	27	2	2.5	0.5	2	7	4	3
31~32	750~805	4.5~4.8	20	30	2	2.5	0.5	2	7	4	3

(续)

直径/mm	面积/mm ²	二次空载 电压/V	伸出长度/mm		留量/mm						
			工具钢	碳钢	预热	闪光	顶锻		总留量	工具钢留量	碳钢留量
							有电	无电			
33 ~ 35	855 ~ 960	4.8 ~ 5.1	20	30	2	2.5	0.5	2	7	4	3
36 ~ 40	1000 ~ 1260	5.1 ~ 5.5	20	30	2.5	3	0.5	2	8	5	3
41 ~ 46	1320 ~ 1660	5.5 ~ 6.0	20	30	2.5	3	1.0	2.5	9	5.5	3.5
47 ~ 50	1730 ~ 1965	6.0 ~ 6.5	22	33	2.5	3	1.0	2.5	9	5.5	3.5
51 ~ 55	2000 ~ 2375	6.5 ~ 6.8	25	40	2.5	3	1.0	3.5	10	6	3.5
55 ~ 80	—	7.0 ~ 8.0	25	40	2.5	4	1.5	4	12	7	5

4. 典型工件的闪光对焊

(1) 棒材闪光对焊 焊前对夹持在夹钳电极间的焊件部分要校直、清除锈和氧化皮等脏物，直径 $d < 40\text{mm}$ 棒材可采用连续闪光对焊；更大直径棒材和方形或矩形截面的型材为改善加热，多采用预热闪光对焊。低碳钢棒材闪光对焊的焊接参数见表 2-2-43。

表 2-2-43 低碳钢棒材闪光对焊的焊接参数

焊件直径 /mm	预热闪光对焊					连续闪光对焊			
	留量/mm			时间/s		留量/mm			时间/s
	总留量	预热与闪光	顶锻	预热	闪光与顶锻	总留量	闪光	顶锻	
5	—	—	—	—	—	6	4.5	1.5	2
10	—	—	—	—	—	8	6	2	3
15	9	6.5	2.5	3	4	13	10.5	2.5	6
20	11	7.5	3.5	5	6	17	14	3	10
30	16	12	4	8	7	25	21.5	3.5	20
40	20	14.5	5.5	20	8	40	35.5	4.5	40
50	22	15.5	6.5	30	10	—	—	—	—
70	26	19	7	70	15	—	—	—	—
90	32	24	8	120	20	—	—	—	—

(2) 管子闪光对焊 根据管子断面和材料可选择连续或预热闪光对焊，夹钳电极用半圆形或 V 形（管径与壁厚比值大于 10 时）并应有适当的工件长度，管子焊后，去除内外毛刺。管子闪光对焊的焊接参数见表 2-2-44 和表 2-2-45。

表 2-2-44 20 钢、12Cr1MoV 及 12Cr18Ni12Ti^① 钢管连续闪光对焊的焊接参数

钢种	尺寸/mm	二次空载 电压/V	伸出长度 l_0 /mm	闪光留量 /mm	平均闪光 速度/(mm/s)	顶锻留量 /mm	有电流顶 锻量/mm
20	25 × 3	6.5 ~ 7.0	60 ~ 70	11 ~ 12	1.37 ~ 1.5	3.5	3.0
	32 × 3			11 ~ 12	1.22 ~ 1.33	2.5 ~ 4.0	3.0
	32 × 4			15	1.25	4.5 ~ 5.0	3.5
	32 × 5			15	1.0	5.0 ~ 5.5	4.0
	60 × 3			15	1.15 ~ 1.0	4.0 ~ 4.5	3.0
12Cr1MoV	32 × 4	6 ~ 6.5	60 ~ 70	17	1.0	5.0	4.0
12Cr18Ni12Ti	32 × 4	6.5 ~ 7.0	60 ~ 70	15	1.0	5.0	4.0

① 此内旧牌号，新标准无时应牌号。

表 2-2-45 大断面低碳钢管预热闪光对焊的焊接参数

管子截面 /mm ²	二次空载 电压/V	伸出长度 /mm	预热时间/s		闪光留量 /mm	平均闪光速 度/(mm/s)	顶锻留量 /mm	有电顶锻 量/mm
			总时间	脉冲时间				
4000	6.5	240	60	5.0	15	1.8	9	6
10000	7.4	340	240	5.5	20	1.2	12	8
16000	8.5	380	420	6.0	22	0.8	14	10
20000	9.3	420	540	6.0	23	0.6	15	12
32000	10.4	440	720	8.0	26	0.5	16	12

(3) 板材闪光对焊 焊前板材端面应平直、无飞边、无压痕和夹层等缺陷,由于主要用于钢板连轧生产线中,拼缝处要承受很大的塑性变形,对断带率有较严格规定,因此接头质量要求较高。为此必须提高最后闪光速度 ($v_{f,终止} \geq 5\text{mm/s}$) 和顶锻速度 ($v_u \geq 60\text{mm/s}$),并且在薄板 ($\delta = 0.3 \sim 2\text{mm}$) 对焊中要采用强迫成形顶锻模式。钢板闪光对焊的焊接参数见表 2-2-46。

表 2-2-46 钢板闪光对焊的焊接参数

板厚 δ/mm	调伸长度 $2l/\text{mm}$	闪光留量 $\Delta f/\text{mm}$	顶锻留量 $\Delta u/\text{mm}$	焊后电极间距 $\Delta \delta/\text{mm}$	闪光时间 t_f/s
1.0	11	4.4	1.6	5.0	1.75
1.5	15	5.8	2.2	7.0	2.25
2.0	20.5	8.0	3.0	9.5	4.0
3.0	29	11.2	4.3	13.5	6.25
4.0	38	14.7	5.3	18.0	9.0
5.0	45	16.7	6.3	22.0	12.0
6.0	50	18.0	7.0	25.0	16.0
8.0	60	22.0	8.0	30.0	25.0
10	66	23.0	9.0	34.0	34.0

(4) 环形件闪光对焊 环形件主要有锚链、传动链等链环,汽车、拖拉机轮辋,自行车及摩托车轮圈等。环形件对焊特点是一定要考虑通过环本身的分流及顶锻时环本身变形弹力的影响。前者需要更大的焊接电流,后者需要适当增大顶锻压力。锚链预热闪光对焊的焊接参数见表 2-2-47。

表 2-2-47 锚链预热闪光对焊参数参考值

锚链 直径 d/mm	二次空 载电压 U_{20}/V	一次电流 I_1/A		预热 次数	焊接通 电时间 t/s	顶锻速 度 v_u $/(\text{mm/s})$	闪光速度 (平均) v_f $/(\text{mm/s})$	留量 Δ/mm					
		闪光	顶锻					接口 间隙	等速 闪光	加速 闪光	有电 顶锻	无电 顶锻	总留量
28	9.27	420	550	2~4	19 ± 1	45~50	0.9~1.1	1.5	4	2	1~1.5	1.5	10~10.5
31	10.3	450	580	3~5	22 ± 1.5	45~50	0.9~1.1	2	4	2	1~1.5	1.5	10.5~11
34	10.3	460	620	3~5	24 ± 2	45~50	0.8~1.0	2	4	2	1.5	1.5	11
37	8.85	480	680	4~6	28 ± 2	30	0.8~1.0	2.5	5	2	1.5	1.5~2	12.5~13
40	10	500	720	5~7	30 ± 2	30	0.7~0.9	2	5	2	1.5~2	2	12.5~13

目前,一些高效低耗的闪光对焊新方法,如程控降低电压闪光法、脉冲闪光法、瞬时送进速度自动控制连续闪光法、矩形波电源闪光对焊等正在得到推广,必将使闪光对焊在工业生产中发挥更大的作用。

2.4.2 电阻对焊

电阻对焊 (Upset Butt Welding) 是指将焊件装配成对接接头,使其端面紧密接触,利用电阻热加热至塑性状态,然后迅速加顶锻力完成焊接的方法。

电阻对焊虽有接头光滑、毛刺小、焊接过程简单等优点,但其接头力学性能较低,对工件端面的准备工作要求高,因此仅用于小断面 (250mm^2 以下) 金属型材的对接,适用范围有限,电阻对焊和闪光对焊的工艺特点比较,见表 2-2-48。

表 2-2-48 电阻对焊和闪光对焊的工艺特点比较

对焊方法	电阻对焊	闪光对焊
接头形式	对接	对接
电源接通时刻	工件端面压紧后,接通电源	接通电源后,再使工件端面局部接触
加热最高温度	低于材料熔点	高于材料熔点
加热区宽度	宽	窄
顶锻前端面状态	高温塑性状态	熔化状态,形成一层较厚的液态金属

(续)

对焊方法	电阻对焊	闪光对焊
接头形成过程	预压、加热(无闪光)、顶锻	闪光、顶锻(连续闪光焊);预热、闪光、顶锻(预热闪光焊)
接头形成实质	高温塑性状态下的固相连接	高温塑性状态下的固相连接(顶锻时液态金属全部被挤出)
优缺点	对接接头光滑、毛刺小、焊接过程简单;力学性能低,对工件准备工作要求高	焊接质量高,焊前端面准备要求低;毛刺较大,有时需用专门的刀具切除
应用范围	小断面金属型材焊接(丝材、棒材、板条和厚壁管的接长)	应用广,主要用于中大断面工件焊接(各种环形件、刀具、钢轨等)

电阻对焊主要应注意以下问题。

(1) 电阻对焊过程中的电阻及其变化 (见图 2-2-44)。

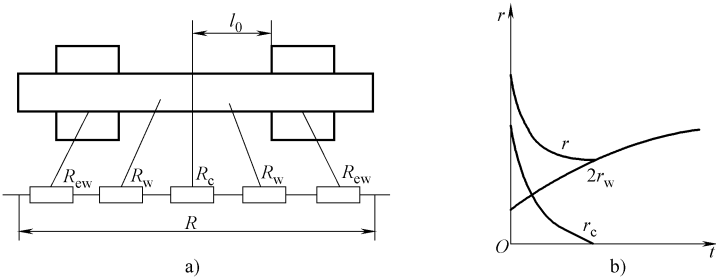


图 2-2-44 电阻对焊过程中的电阻及其变化

a) 等效电路 b) 电阻 r_e 、 $2r_w$ 和 r 的变化

(2) 电阻对焊加热结束时温度分布 (见图 2-2-45)。

(3) 电阻对焊时的焊接热循环 电阻对焊时有两种焊接循环,即等压式和加大锻压力式,如图 2-2-46 所示,前者加压机械简单而易于实现,但后者有利于提高对焊接头质量。

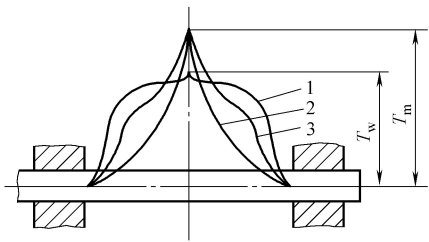


图 2-2-45 对焊加热结束时的温度分布

1—电阻对焊 2—连续闪光对焊 3—预热闪光对焊

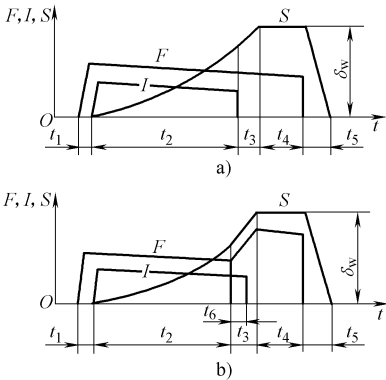


图 2-2-46 电阻对焊的焊接循环

a) 等压式 b) 加在锻压力式

t_1 —预压时间 t_2 —加热时间 t_3 —顶锻时间
 t_4 —维持时间 t_5 —夹钳复位时间 t_6 —有电
流顶锻时间 F —压力 I —电流 S —动夹钳
位移 δ_w —焊接留量 t —时间

(4) 电阻对焊的焊接参数 主要有调伸长度 l 、焊接电流 I_w 和焊接时间 t 、焊接压力 F_w 与顶锻压力 F_u , 有时也给出焊接留量 (焊件缩短量)。低碳钢棒材电阻对焊、小直径链环电阻对焊的焊接

参数参见表 2-2-49、表 2-2-50 和表 2-2-51。

表 2-2-49 线材电阻对焊的焊接参数

金属种类	直径/mm	伸出长度/mm	焊接电流/A	焊接时间/s	顶锻压力/N
碳钢	0.8	3	300	0.3	20
	2.0	6	750	1.0	80
	3.0	6	1200	1.3	140
铜	2.0	7	1500	0.2	100
铝	2.0	5	900	0.3	50
镍铬合金	1.85	6	400	0.7	80

注：顶锻留量等于线材直径，有电顶锻量等于直径的 0.2 ~ 0.3 倍。

表 2-2-50 低碳钢棒材电阻对焊的焊接参数

断面积 /mm ²	伸出长度 ^② /mm	焊接缩短量/mm		电流密度 ^① /(A/mm ²)	焊接时间 ^① /s	焊接压力 /MPa
		有电	无电			
25	6 + 6	0.5	0.9	200	0.6	10 ~ 20
50	8 + 8	0.5	0.9	160	0.8	
100	10 + 10	0.5	1.0	140	1.0	
250	12 + 12	1.0	1.8	90	1.5	

① 焊接淬火钢时，增加 20% ~ 30%。

② 对于淬火钢增加 100%。

表 2-2-51 小直径链环电阻对焊的焊接参数

直径/mm	焊机额定功率 /kVA	二次空载电压/V	焊接时间/s		每分钟焊接链环数
			通电	断电	
19.8	250	4.4 ~ 4.55	4.5	1.0	6.4
16.7	250	3.4 ~ 3.55	5.0	1.0	6.4
15.0	175	3.8 ~ 4.0	3.0	1.0	6.6
13.5	175	3.8 ~ 4.0	2.5	1.0	8.8
12.0	175	2.8	1.5	0.8	8.6

(5) 焊前工件清理 焊前工件对口端面和与夹钳电极接触表面必须严格进行清理；对焊接质量要求高的金属（稀有金属、某些合金钢和有色金属等）常用氩、氦等保护气氛。

2.5 电阻焊设备

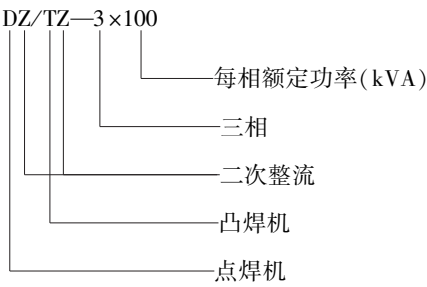
电阻焊设备是指采用电阻加热原理进行操作的一种设备。

2.5.1 电阻焊设备分类和组成

1. 电阻焊设备的型号

迄今国产电阻焊设备型号仍按 GB/T 10249—1988 《电焊机型号编制方法》统一编制。

三相二次侧整流固定式点（凸）焊机（可配置 KD 系列集成电路数字式焊接控制器或 KDZ3 系列微机焊接控制器）示例如下：



目前市场上电阻焊机品牌来源不同,有进口、引进、合资和独资厂家等生产的,因此型号繁多,售价相差亦较大,需仔细区分选择。如进口美国汉森(HANSON)公司的二次整流电阻焊机AB系列(配置301B控制器和304监控系统);引进法国西雅基(SCIAKY)公司技术上海电焊机厂生产的P260CC-10A二次整流电阻焊机;上海电焊机厂与美国梅达(MEDAR)公司合资企业——上海梅达焊接设备有限公司生产的SDZ-3×100二次整流点焊机(配置梅达公司MedWeld760控制器);日本OBARA(小原)株式会社在中国的独资企业——小原(南京)机电设备有限公司生产的工频点焊机SSAN-300(配置T180控制器)等。

随着汽车、航空航天、建筑、交通等工业的发展,对悬挂式点焊机(配微电脑控制器)、一体式焊钳、逆变或二次整流凸焊机、大功率闪光对焊机、多点焊机等电阻焊机的需求量不断增加,同时,逆变电阻焊机也成为近年来我国电焊机行业赶超世界先进水平的一个发展重点,天津七〇七所等已有容量300kVA的该类焊机产品。此外,近年来专用电阻焊机在电阻焊机中的比例也在增大,如多点焊机、自动上下料的多工位点(凸)焊机等。为了提高车身焊装线的自动化程度,保证焊接质量,适应产品的多样化生产,在现代化的车身焊接生产线上,大量采用点焊机器人,并且电伺服点焊钳逐渐成为点焊机器人的标准配置。为实现难焊接材料镀锌钢板、铝合金和超高强度钢的高质量焊接与质量控制开辟了良好的应用前景。

2. 电阻焊设备的组成

电阻焊设备一般由机械装置、供电装置、控制装置三大部分组成,常分为点焊机、缝焊机和对接焊机,如图2-2-47所示。

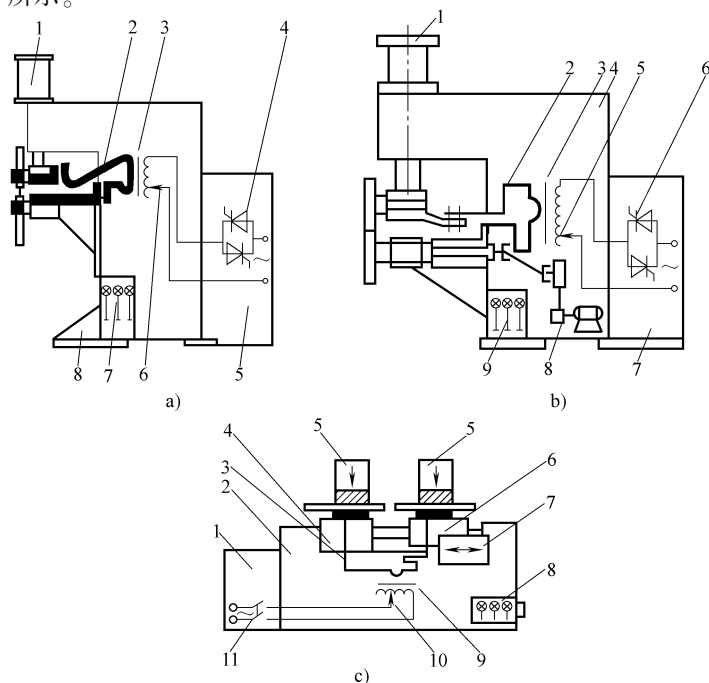


图 2-2-47 电阻焊设备基本组成示意图

a) 点(凸)焊机

1—加压机构 2—焊接回路 3—阻焊变压器 4—主电力开关 5—控制器
6—功率调节机构 7—冷却系统 8—机身

b) 缝焊机

1—加压机构 2—焊接回路 3—阻焊变压器 4—机身 5—功率调节机构
6—主电力开关 7—控制设备 8—传动机构 9—冷却系统

c) 对接焊机

1—控制器 2—机身 3—焊接回路 4—固定座板 5—夹紧机构 6—活动座板
7—送进机构 8—冷却系统 9—阻焊变压器 10—功率调节机构 11—主电力开关

(1) 机械装置 机械装置由机身、加压机构（点焊机、凸焊机、缝焊机）、传动机构（缝焊机）、夹紧和送进机构（对焊机）等组成。选择时应注意机身应有足够的刚度、稳定性并能满足安装要求；加压机构应有良好的随动性和可实现的压力曲线（不变、可变）；夹紧机构应有足够的夹紧力和接触面积，顶锻时焊件不得打滑，钳口距离和对中位置方便可调；送进机构应平稳，实现需要的烧化曲线和足够的顶锻速度和顶锻力。

1) 加压机构：常用点（凸）焊机为适应焊接工艺要求，加压机构类型及应用范围见表2-2-52。

表 2-2-52 常用加压机构类型

名称	电极压力/N	压力变化曲线	应用
杠杆弹簧传动	<3000	不变	25kVA 以下点焊机
电动凸轮传动	<4000	不变	75kVA 以下点焊机
电磁传动	—	不变或可变	小功率精密点焊机
交流伺服电动机加压	—	可变	(中频)点焊机机器人
气压传动	<15000	不变或可变	1000kVA 以下点(凸)焊机
液压传动	<3500	不变	2800kVA 以下多点焊机
气压-液压传动	<9000	不变	200kVA 以下悬挂式点焊机

注：表中数据仅为大致划分，并非明确界限。

目前，广泛应用双行程快速点焊气压传动加压机构，其气路系统典型组成如图 2-2-48 所示，气路切换原理及动作状态见表 2-2-53。

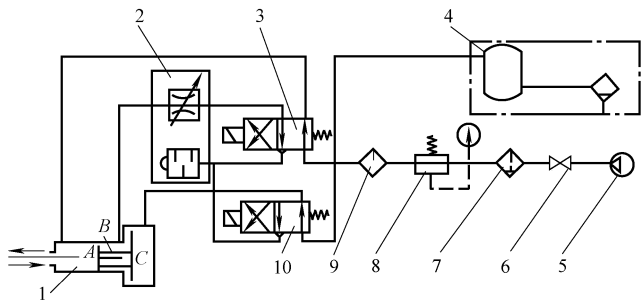


图 2-2-48 气路系统图

1—气缸 2—节流阀（带消声器） 3—二位四通电磁阀 4—储气筒（带排水阀）
5—气源 6—截止阀 7—过滤器 8—减压阀（带压力表） 9—油雾器
10—二位四通电磁阀（用二位三通电磁阀也可）

表 2-2-53 气路系统主要动作状态

序号	二位四通电磁阀状态		气缸各气室状态			电极运动状态
	3 号阀	10 号阀	A	B	C	
1	-	-	+	-	+	电极工作行程退回(中位)
2	+	-	-	+	+	电极工作行程前进(前位)
3	-	+	+	-	-	电极长行程退回(后位)
4	+	+	-	+	-	电极长行程前进(前位)

注：“+”表示有电或有气压；“-”表示无电或无气压。

2) 传动机构：缝焊机的传动方式有 3 种：上滚轮电极为主动，多用于纵向缝焊机和万能缝焊机；下滚轮电极为主动，多用于横向缝焊机；上、下滚轮电极均为主动，电极由滚花轮（修整轮）带动，主要用于缝焊镀层钢板。

步进式缝焊机采用磁力离合器式步进传动机构（见图 2-2-49），目前还有采用先进的交流变频

传动系统。

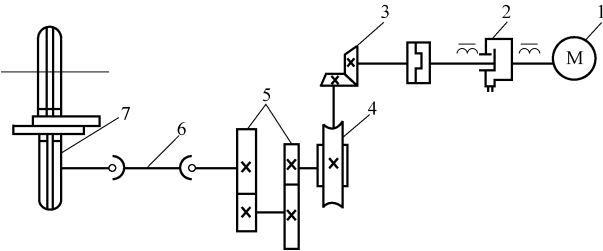


图 2-2-49 步进式传动机构

1—直流电动机 2—磁力离合器 3—锥齿轮对 4—蜗轮蜗杆减速器
5—可变换齿轮组 6—万向轴 7—下焊轮

3) 夹紧和送进机构：对焊机的夹紧机构和送进机构的类型取决于焊机功率大小和使用要求不同，见表 2-2-54。气压—液压联合送进机构常用于中大功率闪光焊机，如图 2-2-50 所示。

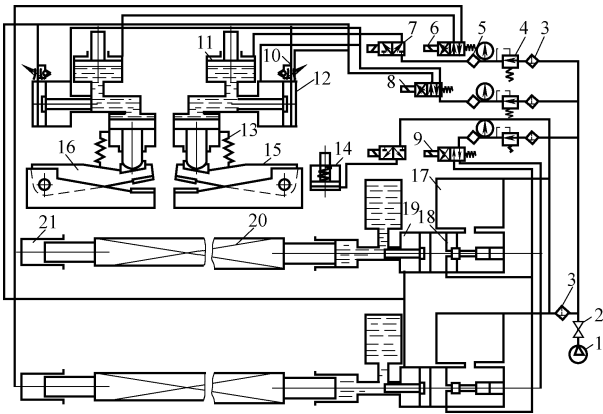


图 2-2-50 气压—液压联合闪光顶锻机构

1—气源 2—气路开关 3—分水滤气器 4—减压阀 5—油雾器 6~9—电磁
气阀及电磁气控阀 10—单向节流阀 11—顶压缸 12—夹紧增压器 13—复位弹簧
14—焊后抬高焊件气缸 15—动夹具 16—静夹具 17—储气筒
18—大口径快速切换气门 19—顶锻增压器 20—导轨 21—动夹具复位气缸

表 2-2-54 常用送进机构和夹紧机构的类型及特点

类型		特 点	适 用 范 围
送进机构	弹簧式	压力不超过 0.75kN;结构简单,易实现自动化,但压力会不断降低	主要用于 10kVA 以下的小功率电阻对焊机
	杠杆式	手工操作,最大顶锻力不超过 30kN,顶锻速度为 15~20mm/s;结构简单,但压力不稳定,顶锻速度低,易使焊工疲劳	多用于容量为 25~100kVA 的非自动焊机
	电动凸轮式	顶锻压力不超过 70kN,顶锻速度一般在 20~25mm/s 以下;结构简单,工作可靠,但顶锻速度受限,对凸轮的制造要求高	用于中等功率的自动和半自动对焊机
	气压式	送进速度快;一般采用液压(阻尼)调速,气压顶锻	用于中等功率闪光对焊机
	液压式	工作可靠,送进速度调节范围宽,顶锻压力不受限制	用于大功率闪光对焊机
	气-液压式	顶锻速度快,顶锻力大,控制准确,但结构复杂	用于中大功率的闪光焊机

(续)

类型		特 点	适 用 范 围
夹 紧 机 构	偏心式	手动,操作简单,动作快,但夹紧力小,且不稳定	一般只用于 25kVA 以下对焊机
	螺旋式	手动,夹紧力在 40kN 以下;结构简单,工作可靠,但操作麻烦,生产率低,焊工体力消耗大	用于中小功率(100kVA 以下)自动对焊机
	杠杆式	夹紧力 30kN 以下,动作快,大量生产小零件较方便	100kVA 以下对焊机
	气压式	一般使用杠杆扩力机构,夹紧力可达 20 ~ 100kN,动作迅速,生产率高,容易控制	广泛用于中等功率(100 ~ 200kVA)对焊机
	气-液压式	夹紧力可达 200 ~ 2500kN,无需液压泵,体积小,动作快	广泛应用于大功率对焊机
	液压式	夹紧力巨大,需高压液压泵,结构复杂	用于功率很大的对焊机

在焊接大截面工件或连续闪光新结构对焊机中,为使闪光过程保持稳定,防止可能产生的瞬间短路现象,采用了振动闪光过程,即使动夹具在要送进过程中以一定的振幅和频率作前后振动;为改善焊接接头的力学性能,瑞士 Schlatter 公司生产的一种钢轨对焊机中将顶锻过程中分为合缝顶锻和可控顶锻两个程序。合缝顶锻是使工件接合面在闪光终止时高速合缝。可控顶锻是以较小的顶锻使工件逐渐完成塑性变形,避免由于过大变形量而使接头区域硬化。

(2) 供电装置 供电装置又称主电力电路,由电阻焊变压器,功率调节机构级数换接器、主电力开关、焊接回路等组成。其中电容储能焊机、直流冲击波焊机、三相低频焊机主电路中还包括一次整流装置和极性转换开关等;逆变式焊机还包括一次整流装置、逆变器和二次整流组件等;二次整流焊机还包括二次整流组件等。

供电装置有以下特点:

1) 可输出大电流、低电压:输出焊接电流通常在 1 ~ 100kA,固定式焊机输出空载电压通常在 12V 以内,移动式焊机在 24V 以内。

2) 功率大并可方便地进行调节:采用大容量、低漏抗的阻焊变压器作焊接电源,如在输油管线的闪光对焊机上,容量最大可达 6000kVA,输出焊接电流可达 1000kA。同时,为满足工艺要求,通常用改变阻焊变压器一次绕组线圈匝数的方法分级调节焊接功率;用控制设备中“相移控制器”来均匀调节某一级数下的焊接功率。

3) 主电源(阻焊变压器)一般无空载运行及负载持续率较低,现行标准规定阻焊变压器额定负载持续率为 50%,并以此为设计依据。但是从焊接生产率特点看,点焊机、凸焊机、对焊机的负载持续率多为 20%,而缝焊机的负载持续率可为 50% 和 100%。

4) 可提供多种焊接电流波形,由于向焊接区输送的电流波形是与被焊件的材质本身热物理性质和使用要求密切相关,是获得优质焊接接头的保证条件,因而对电阻焊工艺过程影响很大,所以电阻焊机将此作为重要分类依据,可分为工频交流电阻焊机、二次整流电阻焊机、直流冲击波电阻焊机、三相低频电阻焊机、逆变式电阻焊机和电容储能电阻焊机。

各类电阻焊机电气框图和其提供的焊接电流波形如图 2-2-51 ~ 图 2-2-56 所示。

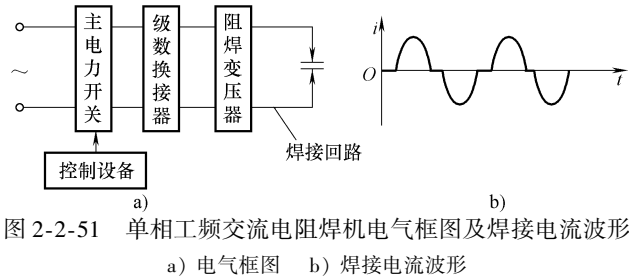


图 2-2-51 单相工频交流电阻焊机电气框图及焊接电流波形
a) 电气框图 b) 焊接电流波形

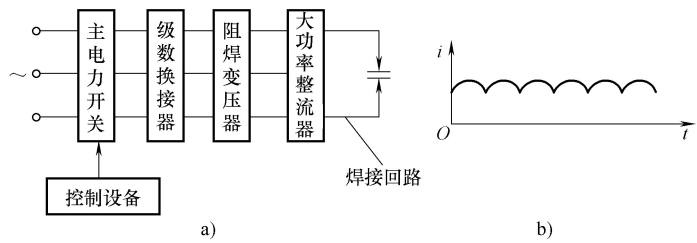


图 2-2-52 二次整流电阻焊机电气框图及焊接电流波形
a) 电气框图 b) 焊接电流波形 (感性负载)

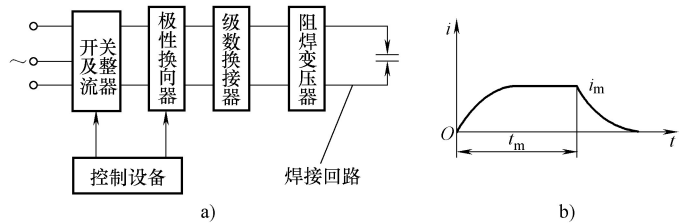


图 2-2-53 直流冲击波电阻焊机电气框图及焊接电流波形
a) 电气框图 b) 焊接电流波形

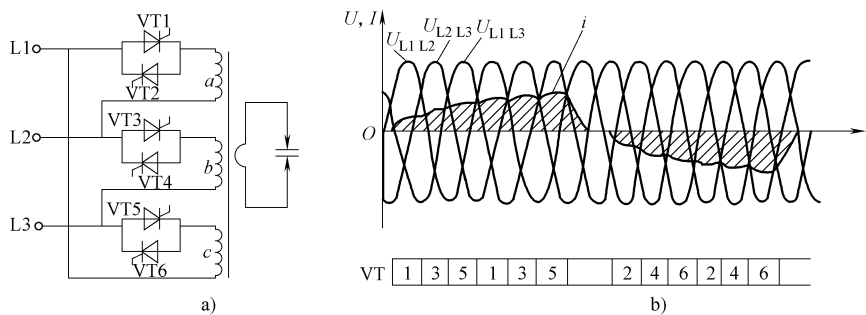


图 2-2-54 三相低频电阻焊机主电路原理图及焊接电流波形
a) 主电路原理图 b) 焊接电流波形

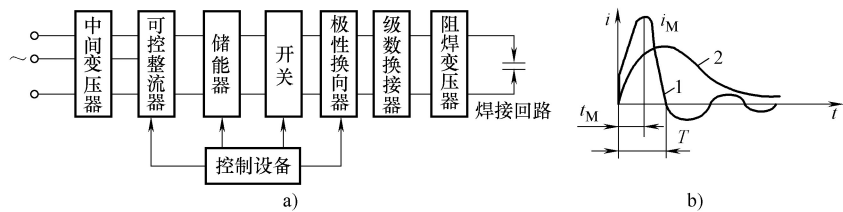


图 2-2-55 电容储能电阻焊机电气框图及焊接电流波形
a) 电气框图 b) 焊接电流波形
1—衰减振荡波形 2—非振荡波形

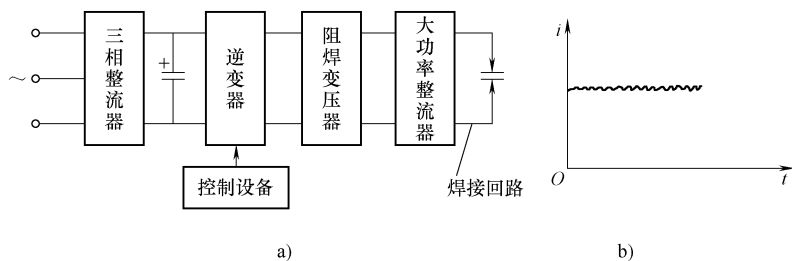


图 2-2-56 逆变式电阻焊机电气框图及焊接电流波形
a) 电气框图 b) 焊接电流波形

各类电阻焊机的特点及应用范围见表 2-2-55，以供选择焊机时参考。

表 2-2-55 电阻焊机的特点及应用范围

类型	特 点	适用范围
单相工频交流焊机	通用性强,控制简单,安装维修容易,初始成本较低,电流脉冲大小和形状容易调整,但功率因数低(通常 0.4 左右),易造成电网不平衡,功率受到一定的限制	广泛应用于各种钢件的点焊、缝焊、凸焊和对焊;个别情况下也用于轻合金的焊接;点、缝焊机的功率一般在 300 ~ 400kVA 以下,凸焊机和对焊机在 1000kVA 以下
二次整流焊机	功率大,焊接电流波形工艺适应性强,三相负载均衡,功率因数高	适用于各种金属材料的点焊、对焊、凸焊和对焊
直流冲击波焊机	功率大,功率因数较高,三相电网平衡,但电流波形不容易调整	主要用于铝合金、镁合金、铜合金、低碳钢的点焊、滚点焊和步进缝焊
三相低频焊机	功率大,功率因数高,三相电网平衡,可获得单脉冲、多脉冲参数,但生产率低	用于焊接大厚度的黑色金属(可用多脉冲参数),以及铝、镁合金(只能用单脉冲参数)等
电容储能焊机	从电网取用瞬时功率低,功率因数高,电流波形陡但不好调节	用于同种或异种金属的薄件、箔材及线材等精密焊接,包括点焊、凸焊、T 形焊、缝焊、电阻对焊和冲击闪光对焊等
逆变式焊机	控制精度高、工艺优势明显,三相电网平衡、体积小、重量轻、节能;目前焊机售价较高	各种金属材料和各种电阻焊方法,尤其在点焊机器人和汽车焊装线上优越性显著

5) 焊机功率的选择：点焊机的功率一般根据被焊接材料料的性质、板厚来选择。点焊厚度在 2mm 以下的低碳钢薄板，通常选用 50kVA 以下的点焊机即可；点焊厚度为 5mm 以上的低碳钢板，通常选用 200kVA 以上的点焊机。焊件的导电、导热性增加时，所需焊机功率随之增加。点焊铝合金所需焊机功率为点焊同样厚度钢板所需功率的 2 ~ 3 倍。

凸焊机的功率通常较大（63kVA 以上），并可根据工件厚度、凸点尺寸及凸点数来选择其大小。

选择缝焊机的功率，除了需考虑被焊材料性质和厚度外，还需考虑焊接速度。焊接速度增加时，要得到同样强度和密封性的焊缝，所需焊机的功率必须相应增加。

对焊机的功率一般根据焊接截面尺寸、工件材料性质和对焊方法等来选择。低碳钢电阻对焊所需焊机功率通常为 0.3 ~ 0.5kVA/mm²，连续闪光对焊所需功率为 0.15 ~ 0.3kVA/mm²，预热闪光对焊所需功率为 0.05 ~ 0.1kVA/mm²。

(3) 控制装置 其功能和组成如下：

1) 控制装置的主要功能包括提供信号控制电阻焊机动作；接通和切断焊接电流；控制焊接电流值；进行故障监测和处理。

2) 控制装置基本组成：程序转换定时器用来实现电阻焊焊接循环中各程序段的时间调整；相移控制器用来完成焊接功率的均匀调节，即焊接电流的热量控制，同时还可实现网压自动补偿、恒

流、电流上坡与下坡、预热及后热、电流递增等；触发器是将触发脉冲耦合输出给断续器；断续器是主电力开关，用以接通和切断主电源（阻焊变压器）与电网的连接。单相及三相断续器及触发器简化电路原理图如图 2-2-57 和图 2-2-58 所示。

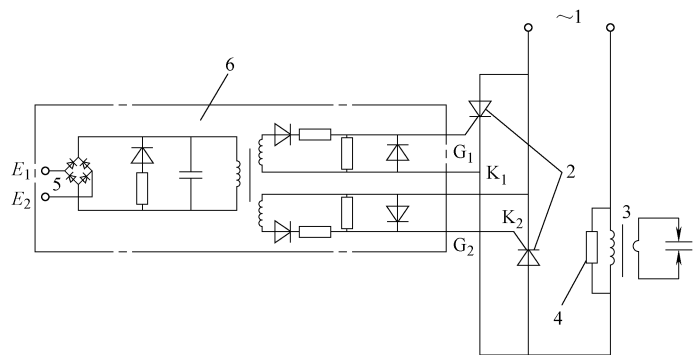


图 2-2-57 单相断续器及触发器原理图

1—单相电源 2—大功率晶闸管 3—阻焊变压器 4—并联电阻 5—触发信号输入 6—触发电路

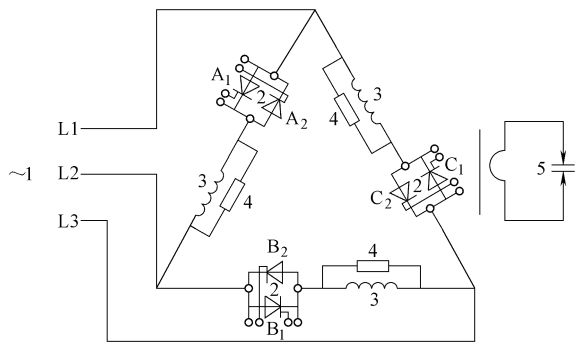


图 2-2-58 三相断续器及触发器原理图

1—三相电源 2—大功率晶闸管 3—阻焊变压器一次绕组 4—并联电阻 5—焊接回路

根据用户使用要求，电阻焊机上新配用的控制设备有集成电路式和微处理器式两种，表 2-2-56 和表 2-2-57 列出了其中部分控制器的主要技术参数。

表 2-2-56 集成电路型控制器主要技术参数

类型	型号	工作程序/循环	热量调节(%)	晶闸管规格	网压波动补偿强度
点焊或缝焊 ^①	KD9—500	程序 1 为 3 ~ 100 周 程序 2、3、4、5 为 0 ~ 99 周	40 ~ 100	500A/1200V	网路电压变化 $U_n \pm 10\%$ 时焊接电流变化率 $\leq \pm 5\%$, 但允许 (- 20% ~ 10%) U_n 波动
	KD9—800A			800A/1200V	
	KD9—1100			1100 A/1200V	
点焊或凸焊 (双脉冲) ^②	KD10—500	主程序:程序 1 为 2 ~ 100 周, 程序 2*、3*、4、5 为 0 ~ 99 周,子程序 6、7、8、9 为 0 ~ 99 周,锻压延时(12)0 ~ 99 周。 * 号的数字量为子程序循环次数		500A/1200V	
	KD10—800A			800A/1200V	
	KD10—1100			1100 A/1200V	

① 控制箱可对两组焊接参数进行控制，即工艺参数 I、工艺参数 II。每组工艺参数的程序过程相同，各程序时间范围及热量调节均符合表中规定。

② 控制箱有 2 个加热脉冲，各个脉冲的延时热量均可独立调节，并能进行脉冲调制，成为多脉冲加热形式。

表 2-2-57 单相微型控制器

型号	主要结构、技术特点	生产厂家
KD3—500—1	68HC711E9 微机,恒压、恒流控制精度均为 $\pm 2\%$, 配用 200kVA 点(凸)焊机,8 套焊接参数存储与选择	上海电焊机厂
KD3—800	配用 400kVA 点(凸)焊机,其余同 KD3—500—1	
SUN98 系列 (例:SUN9810)	配用 200kVA 点(凸)焊机,工控 CPU,有群控接口,可集中管理	天津商科机电设备有限公司
HCW 系列 (例:HCW—1A)	8098 单片机,恒流控制精度 $\pm 2\%$, 具有 9 个加热脉冲、16 种参数,有群控接口,可集中管理	天津陆华科技公司(707 所)
MCW 系列 (例:MCW—205)	配用 200kVA 或 $\leq 400\text{kVA}$ 点(凸)焊机,恒流控制精度 $\leq \pm 3\%$, 恒流双脉冲	江都市焊接设备厂
MWC—B 系列	配用任何一种单相电阻焊(点、凸、缝、对)机,恒流控制精度 $\leq \pm 3\%$, 可利用示教盒远距离设定	沈阳自动化研究所
SK—Ⅲ	恒压、恒流控制精度均为 $\pm 2\%$, 配用 $\leq 250\text{kVA}$ 点(凸)焊机,10 套焊接参数存储与选择	广州松兴电器有限公司
MEDAR200S 系列	具有网压自动补偿和恒电流两种模式,具有阶梯功能(递增器两个),可控制双轮双气路	上海梅达焊接设备有限公司

3) 电网负荷分配器：由于大部分电阻焊机为单相供电，焊接通电时间仅几个周波，而实际焊接功率往往比额定功率还要大好几倍。

对供电容量有限的中小型企业，由于电网超负荷工作经常出现跳闸而无法正常工作，直接影响焊接质量。将焊机按容量平均分配到三相中是一项措施，而采用电网负荷分配器使各台焊机不在同一时间通电是一个更合理而经济的解决办法。例如国产 QS 型电网平衡控制系统（见图 2-2-59）由工业控制机、平衡控制机、显示器、打印机、UPS 电源等组成，配合具有群控接口的微机电阻焊控制器（见表 2-2-57）可以实现最多 96 台在线焊机的群控管理，保证电网均衡使用，提高焊接质量。

4) 控制装置的网络化：在大规模使用电阻焊机的场合，如汽车车身生产线，可将多台焊接控制器用本区网络（LAN）联网。简单的联网可用个人计算机（PC）通过调制解调器（MODEM）与数十台焊接微处理器交换信息，如编写焊接程序、监视和收集焊接数据、保存焊接数据档案库。更大规格可将数百台焊接微处理器联网，主机与焊接微处理器之间不仅能进行数据比较和交换，而且还能对数据进行分析。例如，国产 HZ 型集中控制系统（图 2-2-60 和图 2-2-61）可用于对具有串行接口及相应通信软件的控制器（如 HCW 系列微机阻焊控制器，见表 2-2-57）进行远距离集中控制和管理，以实现以下功能：

- ① 对各台焊机焊接规范的集中输入和输出。
- ② 对各台焊机故障的集中报警。
- ③ 根据供电容量情况，限制同时用电的焊机数量；特别适用于电力容量不足的厂家。
- ④ 提供实用的显示画面。
- ⑤ 定时或随机打印各种报表，有利于工艺管理和设备管理以及系统配置。

该系统由一台工业控制机作为主机，配有 1~4 台网络管理器，其中主网络管理器 1 台，副网络管理器 1~3 台。主网络管理器为双 CPU，副网络管理器为单 CPU。一台网络管理器可以控制 32 台焊机，最多可控制 128 台。

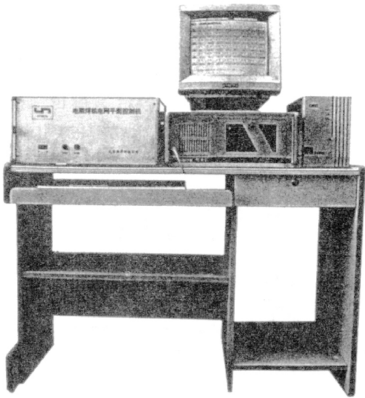


图 2-2-59 QS 型电网平衡控制系统（最大控制距离 300m）

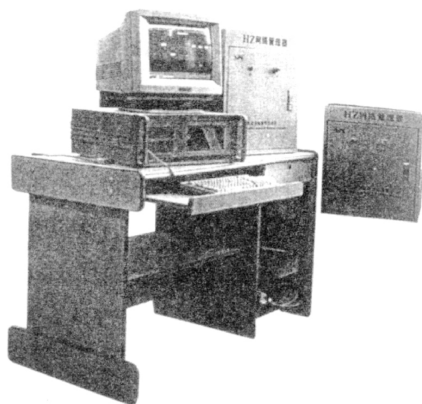


图 2-2-60 HZ 型集中控制系统

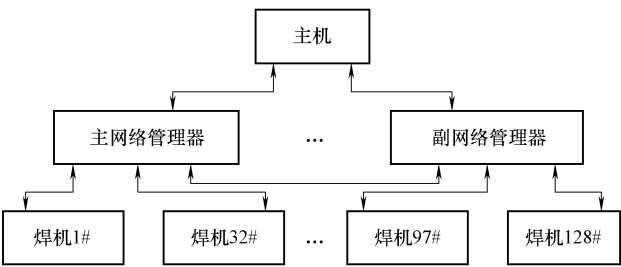


图 2-2-61 HZ 型集中控制系统原理图

2.5.2 电阻焊设备的主要技术参数

电阻焊设备及其主要构件的设计、制造、试验、出厂检验等均需符合相应的电焊机行业现行标准，如 GB/T 15578—2008 《电阻焊机的安全要求》、JB/T 9529—1999 《电阻焊机变压器 通用技术条件》、JB/T 10101—2000 《固定式点、凸焊机》、JB/T 3946—1999 《凸焊机电极平板槽子》、ISO 12166—2006 《电阻焊设备—用于汽车工业多点焊机具有一个次级线圈的变压器的特殊要求》等，可参阅本卷相关内容或相关国内外标准。

1. 电阻焊机主要技术要求

电阻焊设备的相关主要技术要求和试验数据见表 2-2-58 ~ 表 2-2-61。

表 2-2-58 电阻焊机主要技术要求

项 目		技术要求		前提条件		
不与地相接的电气回路	对地绝缘电阻/MΩ	≥2.5		在规定使用条件下		
	应承受试验电压/V	1700	持续 1 min	额定工作电压	≤220V	
		2000			220 ~ 380V	
		2250			380 ~ 500V	
		—			500 ~ 660V	
阻焊变压器	空载视在功率/W	不大于表 2-2-59 规定的数值		额定一次电压及额定级数时		
	空载电流/A					
	线圈温升极限/K	95	B 级绝缘	电阻法测定	水冷变压器	
		115	F 级绝缘			
		90	B 级绝缘	温度计法测定		
		110	F 级绝缘			
二次最大短路电流允差(%)		- 10	以间接方法测定			
		± 5	用大电流计直接测定			
电极压力实际值与额定值之差		≤ ± 8% 额定值				

表 2-2-59 阻焊变压器空载视在功率和空载电流允许值

额定视在功率/kVA	空载视在功率 S_0 /VA	不同电压时的空载电流 I_{10} /A				
		额定一次电压 U /V				
		220	380	415	500	550
5	1000	4.5	2.6	2.4	2.0	1.8
10	1800	8.2	4.7	4.3	3.6	3.3
16	2600	11.6	6.7	6.2	5.1	4.7

(续)

额定视在功率/kV·A	空载视在功率 S_0 /V·A	不同电压时的空载电流 I_{10} /A				
		额定一次电压 U /V				
		220	380	415	500	550
25	3750	17.0	9.9	9.0	7.5	6.8
40	5600	25.5	14.7	13.5	11.2	10.2
63	8200	37.2	21.6	19.7	16.4	14.9
80	8800	40.0	23.2	21.2	17.6	16.0
100	10000	45.5	26.3	24.1	20.0	18.2
125	11250	51.1	29.6	27.1	22.5	20.5
160	12800	58.2	33.7	30.8	25.6	23.3
200	14000	63.6	36.8	33.7	28.0	25.5
250	15000	68.2	39.5	36.1	30.0	27.3
315	15700	71.6	41.4	38.0	31.5	28.6
400	20000	90.9	52.6	48.2	40.0	36.4

注：额定视在功率小于 160kVA 的变压器与焊钳连为一体的焊机，其 S_0 和 I_{10} 的允许值可比表中数值大 2.5 倍。

表 2-2-60 部分工频焊机额定级试验数据

型号	额定功率 /kVA	二次回路尺寸		空载试验		短路试验			二次最大 短路电流 /A
				空载电压 /V	空载电流 /A	短路阻抗/ $\mu\Omega$			
		臂伸长度	臂间距离			总阻抗	电阻	感抗	
SO432—5A	31	250	190	4.6	44	201	107	173	22500
DN—63	63	600	200	6.67	7.75	300	151	259	22200
DN2—100	100	500	250	6.45	9.75	276	112	252	23300
DN2—200	200	500	250	8.25	20	284	110	262	29000
TN—63	63	250	255	6.67	12	178	73.3	162	27500
FN1—150—2	150	800	140	6.8	8	231	79.7	217	29400
FN1—150—5	150	1100	80	8.37	18.9	250	106	226	33500
M272—6A	110	600	110	6.35	12	310	116	287	20500
UN—40	40	—	—	5.5	3.65	194	131	143	28300
UN—125	125	—	—	8.9	7.63	229	98	207	38900
UN17—150—1	150	—	—	7.0	11.8	170	72.5	153	41200
UN7—400	400	—	—	10.7	44.5	114	80.6	80.6	93600

表 2-2-61 电阻焊机二次回路直流电阻实测值

焊机种类	型号	直流电阻/ $\mu\Omega$	环境温度/℃
点焊机	DN2—100	40	15
	DN2—200	32	15
	DN—63	36	20
	SO432—5A	45	10
	P300DTI—A	36	12
凸焊机	TN—63	25	10
缝焊机	FN1—150—2	38	15
	M272—6A	42	25
对焊机	UN17—150—1	40	25

2. 电阻焊机的主要技术参数

电阻焊机的技术性能指标是选择设备的重要依据，现将部分国产焊机主要技术参数见表 2-2-62 ~ 表 2-2-64。

表 2-2-62 典型的点焊机和凸焊机的主要技术参数

焊机类型			型号	电源种类	额定功率 ($\text{kV} \cdot \text{A}$)	负载持续率(%)	二次空载电压/V	最大二次电流/kA	电极臂 伸长/mm	焊接板厚度/mm
点焊机	固定式	圆弧运动式	DN—25	工频	25	20	1.76 ~ 3.52		250	钢 3 + 3
			SO232	工频	17	50	1.8 ~ 3.6	15	550	钢 2 + 2 铝 1.2 + 1.2
			SO432	工频	31	50	2.5 ~ 4.6	25	550、800	钢 2.5 + 2.5
			DN3—75	工频	75	20	3.16 ~ 6.21		800	钢 2.5 + 2.5
		垂直运动式	SDN—16	工频	16	50	1.86 ~ 3.65	18	240	钢 2 + 2
			SO462	工频	31	50	2.5 ~ 4.6	23	360	钢 3 + 3
			DN—63	工频	63	50	3.22 ~ 6.67	21	600	钢 6 + 6 铝 0.8 + 0.8
			DN2—100	工频	100	20	3.65 ~ 7.30	19	500	钢 4 + 4 铝 0.6 + 0.6
			DN—125	工频	125	50	4.22 ~ 8.44	30	600	钢 8 + 8 铝 1.2 + 1.2
			P260CC—10A	二次整流	152	50	4.52 ~ 9.04	55	1000	钢 6 + 6 铝 3 + 3
			DN2—200	工频	200	20	4.42 ~ 8.85	26	500	钢 6 + 6 铝 1.0 + 1.0
			P300DTI—A	三相低频	247	50	1.82 ~ 7.29	85		钢 6 + 6 铝 3.2 + 3.2
			DB2—100	RC 逆变式	100	50	—	—	—	—
			DR—100—1	电容储能	100(J)	20	充电电压 430	—	120	不锈钢 0.5 + 0.5
	移动式	便携式	KT218N2	工频	2.5	50	2.3	—	500	钢 1.5 + 1.5
			KT826N4	工频	26	50	4.7	—	500	钢 2.5 + 2.5
		悬挂式	CI30S—2A(O)	工频	150	50	14 ~ 19	21.5	200	钢 3 + 3
			DN3—63	工频	63	50	16.5	—	425	钢 2 + 2
			TN—63	工频	63	50	3.22 ~ 6.67	—	250	—
凸焊机			TN—125	工频	125	50	4.22 ~ 8.44	—	300	—
			TN1—200A	工频	200	20	4.42 ~ 8.85	—	500	—
			E2012—T6A	二次整流	260	50	2.75 ~ 7.60	90	400	—
			TR—3000	电容储能	3000(J)	20	充电电压 420		250	—

注：表中未特别注明的“钢”指低碳钢。

表 2-2-63 典型缝焊机主要技术参数

焊机类型	型号	特性	额定功率 ($\text{kV} \cdot \text{A}$)	负载持续率(%)	二次空载电压/V	电极臂长 /mm	焊接板厚度 /mm
横向缝焊机	FN—150—1	工频	150	50	3.88 ~ 7.76	800	钢 2 + 2
	FN—150—8		150	50	4.52 ~ 9.04	1000	钢 2 + 2
	M272—6A		110	50	4.75 ~ 6.35	670	钢 1.5 + 1.5
	M230—4A		290	50	5.85 ~ 9.80	400	镀层钢板 1.5 + 1.5
	FN—100		100	50	4.75 ~ 6.35	600	钢 1.5 + 1.5
纵向缝焊机	FN1—150—2	工频	150	50	3.88 ~ 7.76	800	钢 2 + 2
	FN—150—5		150	50	4.80 ~ 9.58	1100	钢 1.5 + 1.5
	M272—10A		170	50	4.2 ~ 8.4	1000	钢 1.25 + 1.25
	FR2—125	电容储能	125/J	50	—	—	不锈钢 0.05 + 0.05 ~ 0.5 + 0.5
横向缝焊机	FZ—100	整流	100	50	3.52 ~ 7.04	610	钢 2 + 2
通用缝焊机	M300ST1—A	低频	350	50	2.85 ~ 5.70	800	铝合金 2.5 + 2.5

表 2-2-64 典型对焊机的主要技术参数

焊机类型		型号	送进机构	额定功率 (kVA)	负载持续 率(%)	二次空载 电压/V	夹紧力/kN	顶紧力 /kN	额定焊接截 面积/mm ²
电阻 对 焊机	通用	UN—1	弹簧加压	1	8	0.5 ~ 1.5	0.08	0.04	1.1
		UN—3	弹簧加压	3	15	1 ~ 2	0.45	0.18	5.0
		UN—10	弹簧加压	10	15	1.6 ~ 3.2	0.90	0.35	50
		UN1—25	杠杆加压	25	20	1.76 ~ 3.52	偏心轮	—	300
闪光 对 焊机	通用	UN40	气-液加压	40	50	3.73 ~ 6.33	4.5	14	300
		UN1—75	杠杆加压	75	20	3.52 ~ 7.01	螺旋	30	600
		UN2—150—2	凸轮加压	150	20	4.05 ~ 8.10	100	65	1000
		UN17—150—1	气-液加压	150	50	3.80 ~ 7.60	160	80	1000
		UN4—300—1	气-液加压	300	20		350	250	2500
	钢窗专用	UY—125	气-液加压	125	50	5.51 ~ 10.85	75	45	400
	薄板专用	UN5—250	凸轮烧化、 气液压顶锻	250	20		300	150	1080
	轮圈专用	UN7—400	气-液加压	400	50	6.55 ~ 11.18	680	340	2000
	钢轨专用	UN6—500	液压	500	40	6.80 ~ 13.60	600	350	3500

应该指出，近年来国内电阻焊设备的研发和生产发展很快，设备外观造型、制造工艺、品种齐全性和多样性，尤其是设备的机械、供电和控制装置均全面得到提高，形成逐步和国际技术接轨的势头，取得很大的成绩。图 2-2-62 为部分国产电阻焊设备实物照片，其中 DN1—16 为脚踏式工频点焊机（16kVA）；DTN—200 为气动式垂直加压工频点（凸）焊机（200kVA）；FN—80H 为气压式工频横向缝焊机（80kVA）；FN—150Z 为气压式工频纵向缝焊机（150kVA）；UN—40 为工频电阻对焊机（40kVA）；UNS—63 为闪光对焊机（63kVA）；DN2—25 为一体式悬挂点焊机（25kVA）DB—6A/DB—6T 为逆变式精密点焊机（6kVA）；TR—60000 为电容贮能微波炉波导管焊接专机（60000J）；TR—20000 为电容贮能复印机外壳焊接专机（20000J）；DP—125 电容贮能精密点焊机（125J、双脉冲）。

同时，在国内电阻焊机市场上还有许多进口焊机，如美国汉森（HANSON）公司生产的点焊/凸焊/点凸焊/缝焊/滚点焊的单相交流/次级整流（20 ~ 250kVA）焊机（见图 2-2-63）、三相低频/脉冲/可变极性的（150 ~ 1000kVA）点焊/凸焊/点凸焊焊机、三相二次整流（65 ~ 1000kVA）点焊/凸焊/点凸焊焊机、三相低频/二次整流（15 ~ 600kVA）缝焊/滚点焊焊机、（IGBT）逆变式（170kVA、340kVA）点焊/凸焊/缝焊三用焊机等；瑞士苏莱特（SCHLATTER）公司的钢轨闪光对焊机，日本宫地（MIYACHI）株式会社生产的小功率逆变电阻焊机（见图 2-2-64）；奥地利 EVG 公司（Entwicklungs-und Verwertungs-Gesellschaft）生产的网片电阻焊机。当然，进口焊机的价位一般都较高。

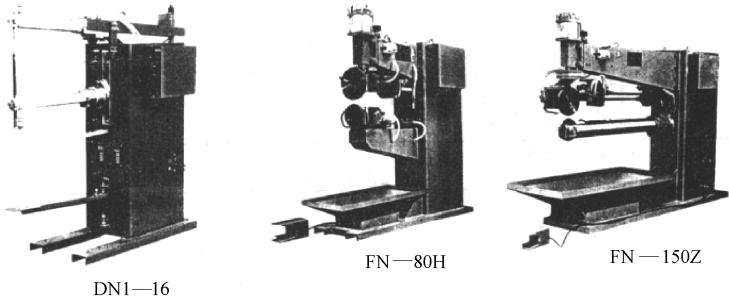


图 2-2-62 部分电阻焊设备实物照片



图 2-2-62 部分电阻焊设备实物照片 (续)

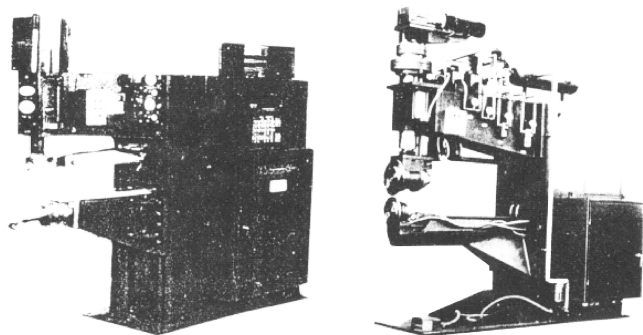


图 2-2-63 二次整流点焊机和缝焊机 (HANSON)

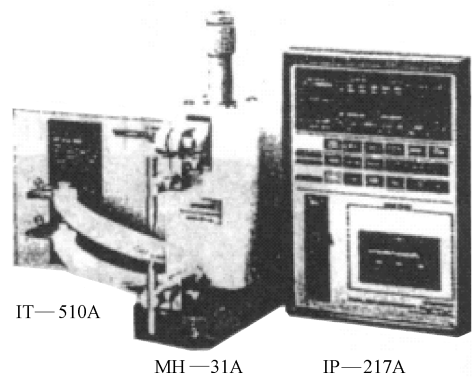


图 2-2-64 IS-217A 逆变式精密点焊机

2.5.3 电阻焊设备的电极

电极是电阻焊机上的一个关键易损耗零件，正确选用电极是获得优质接头、提高生产率的重要手段。

电极的功用主要包括向焊接区传输电流；向焊接区传递压力；导散焊件表面及焊接区的部分热量；调节和控制电阻焊加热过程中的热平衡；将工件定位、夹持于适当位置等。

实际生产中应注意，不只是由于电极工作端面变形的加粗量超过规定才予以修整，而往往是由于电极与焊件表面发生粘损这一恶性循环现象，将使焊接生产不能继续进行。产生这一现象的原因主要与电极处于苛刻的焊接工艺条件有关。因此应对电极材料、电极形式、焊接对象（材质及结构）、焊机类型等因素进行综合考虑。

1. 电极材料

对电极材料的要求有以下方面：有足够的高温硬度与强度，再结晶温度高；有高的抗氧化能力并与焊件材料形成合金的倾向小；在常温和高温都有合适的导电、导热性；具有良好的加工性能等。

有关电阻焊电极材料的国内外标准较多，（如 JB/T 4281—1999、HB 5420—1989 和 JB/T 7598—2008 等），标准中对材料进行了分类，规定了化学成分、物理和力学性能要求。但是，电极材料的选取需要兼顾它的多方面性能，即要根据不同的被焊材料、结构电阻焊方法综合考虑。例如在焊接不锈钢或其他高温合金时，由于需要施加较大的焊接力，选择电极材料时应重点保证它的高温强度和耐磨硬度，适当降低对电导率和热导率的要求；而在点焊铝合金类高电导率和热导率材料时，选用电极材料就应重点保证具有高的电导率和热导率，适当降低对材料高温强度和硬度要求，并减少电极与焊件的粘连等。

目前，实际生产中常用电极材料和适用范围见表 2-2-65，供选用时参考。

表 2-2-65 常用电极材料的成分及性能

材料名称	化学成分 (质量分数,%)	材 料 性 能			适用范围
		硬度 HV(30kg)	电导率/($\mu\text{s}/\text{m}$)	软化温度/K	
		不小于			
纯铜 Cu-ETP	Cu $\geq$ 99.9	50 ~ 90	56	423	适用于制造铝及铝合金的 电极,也可用于镀层钢板的 点焊
镉铜 CuCd1	Cd 0.7 ~ 1.3	90 ~ 95	43 ~ 45	523	
锆铌铜 CuZrNb	Zr 0.10 ~ 0.25	107	48	773	

(续)

材料名称	化学成分 (质量分数,%)	材 料 性 能			适用范围
		硬度 HV(30kg)	电 导 率/(μs/m)	软化温度/K	
		不小于			
铬铜 CuCrI	Cr 0.3 ~ 1.2	100 ~ 140	43	748	最通用的电极材料,广泛用于点焊低碳钢、低合金钢、不锈钢、高温合金、电导率低的铜合金以及镀层钢等
铬锆铜 CuCrZr	Cr 0.25 ~ 0.65 Zr 0.08 ~ 0.20	135	43	823	
铬铝镁铜 CuCrAlMg	Cr 0.4 ~ 0.7 Al 0.15 ~ 0.25 Mg 0.15 ~ 0.25	126	40	—	
铬锆铌铜 CuCrZrNb	Cr 0.15 ~ 0.4 Zr 0.10 ~ 0.25 Nb 0.08 ~ 0.25 Ce 0.02 ~ 0.16	142	45	848	
铍钴铜 CuCo2Be	Co 2.0 ~ 2.8 Be 0.4 ~ 0.7	180 ~ 190	23	748	适用于点焊电阻率和高温强度高的材料,如不锈钢、高温合金等;凸焊或对焊电极夹具及镶嵌电极
硅镍铜 CuNi2Si	Ni 1.6 ~ 2.5 Si 0.5 ~ 0.8	168 ~ 200	17 ~ 19	773	
钴铬硅铜 CuCo2CrSi	Co 1.8 ~ 2.3 Cr 0.3 ~ 1.0 Si 0.3 ~ 1.0 Nb 0.05 ~ 0.15	183	26	600 876	
钨 W	99.5	420	17	1273	点焊高导电性有色金属 (Cu、Ag)的复合电极镶块
钼 Mo	99.5	150	17	1273	
W75Cu	Cu25	220	17	1273	复合电极镶块材料;凸焊、 对焊时镶嵌电极
W78Cu	Cu22	240	16	1273	
WC70Cu	Cu30	300	12	1273	
W65Ag	Ag35	140	29	1173	抗氧化性好

注: 1. 钨、钼、W75Cu、W78Cu、WC70Cu 和 W65Ag 为烧结材料,其余材料均为冷拔棒和锻件。

2. 对于硬度,锻件取下限,直径小于 25mm 的冷拔棒取上限。

3. HV (30kg) 是指加 30kg 砝码的 HV 值。

随着现代工业生产中自动焊机、焊接机器人的大量使用,电阻焊在高速、高节拍下完成,对电极材料的强度、软化点和导电性能等提出了更高的要求,颗粒强化铜基复合材料(又称弥散强化铜)作为新型电极材料受到重视,这是一种在铜基体中加入或通过一定的工艺原位生成微细、弥散分布、具有良好热稳定性的第二相粒子,该粒子可阻碍位错运动,提高材料的室温强度,同时可以阻碍再结晶的发生,从而提高了材料的高温强度,如 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 、 TiB_2/Cu 复合材料。目前,可采用内氧化法和机械合金化法制取弥散强化铜。

国内外典型的弥散强化铜电阻焊电极材料见表 2-2-66。

表 2-2-66 新型电极材料的成分及性能

材料质量 分数(%)	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	电 导 率 /($\mu\text{s}/\text{m}$)	适用范围
Cu-0.38 Al_2O_3	490	5	84	汽车制造,使用寿命为铬铜点焊电极 4 ~ 10 倍
Cu-0.94 Al_2O_3	503	7	83	
Cu-0.16Zr-0.26 Al_2O_3	434	8	88	
Cu-0.16Zr-0.94 Al_2O_3	538	5	76	

2. 电极结构

电阻焊电极根据工艺方法不同,可分成点焊电极、凸焊电极、缝焊电极和对焊电极四种。

(1) 点焊电极 点焊常用电极如图 2-2-65 所示。电极的公称直径 D 根据标准规定其系列为

10mm、13mm、16mm、20mm、25mm、32mm、40mm，对于这些直径为 D 的电极，其最大电极力应符合表 2-2-67 的要求，且当 $D \leq 25\text{mm}$ 时，电极尾部锥度为 1:10；当 $D > 25\text{mm}$ 时，锥度为 1:5。

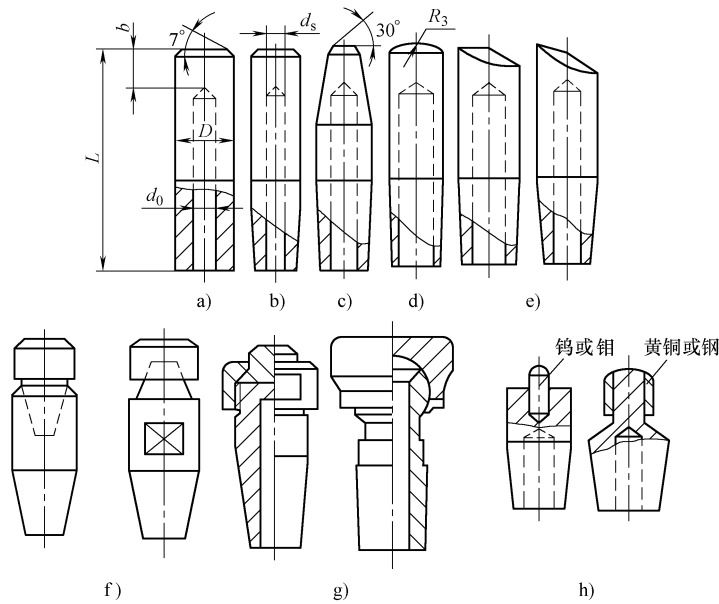


图 2-2-65 点焊常用电极头形式

- a) 平面形 (F 型) b) 圆锥形 (C 型) c) 尖头形 (P 型) d) 球面形 (R 型)
e) 偏心形 (E 型) f) 帽状电极 g) 球铰链平衡电极 h) 复合电极

表 2-2-67 电极公称直径与最大电极压力的关系

公称直径/mm	10	13	16	20	25	32	40
最大电极压力/kN (参考值)	2.5	4	3.6	10	16	25	40

应该指出，根据焊接部位的可达性，允许电极设计成适当形状（如弯曲形等），但应保证具有良好的冷却效果和避免与焊件在非点焊部位相碰而产生分流。常用电极如图 2-2-66 所示。

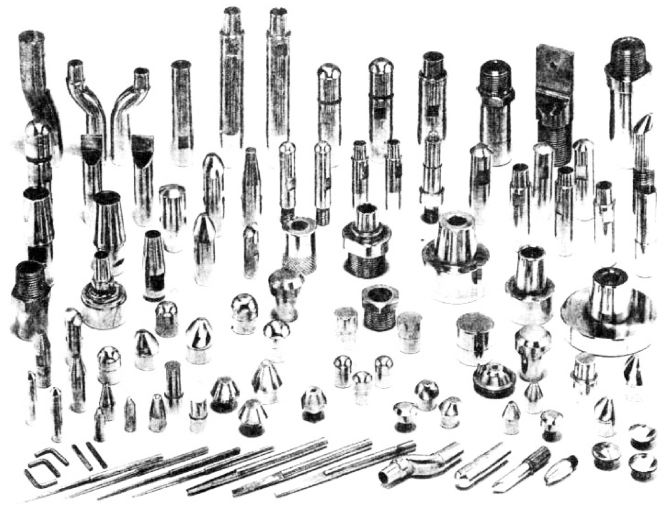


图 2-2-66 点焊电极实物

(2) 凸焊电极 凸焊常用电极是平面、球面或曲面电极以及工作端面与工件外形相适应的电极,如图 2-2-67 所示。

局部位置的多点凸焊采用大平头棒状电极;有时为克服各凸点间的压力不均衡,采用可转动电极(见图 2-2-68)。

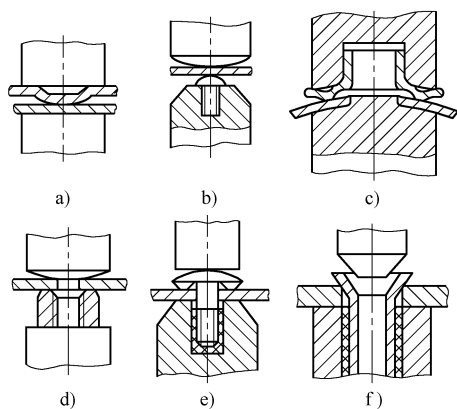


图 2-2-67 单点凸焊用电极

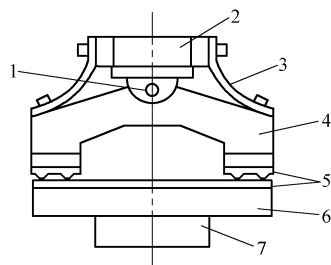


图 2-2-68 可转动的凸焊电极

1—枢轴 2、7—上、下座板 3—铜分路
4、6—上、下电极 5—工件

凸焊时为保证上、下两个焊件的定位,经常需要使用一些定位夹具,有些夹具是单独的,有些是和凸焊电极制成一体的,如图 2-2-69 所示。

(3) 缝焊电极 缝焊电极又称滚轮电极或焊轮,其基本结构如图 2-2-33 所示。缝焊电极(含轴)实物照片如图 2-2-70 所示。

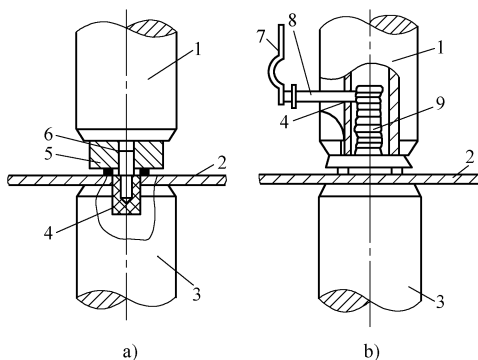


图 2-2-69 专用的凸焊电极和夹具

a) 螺母凸焊 b) 螺栓凸焊

1—上电极 2—焊件 3—下电极 4—绝缘体 5—螺母
6—定位销 7—弹簧 8—夹持件 9—螺栓

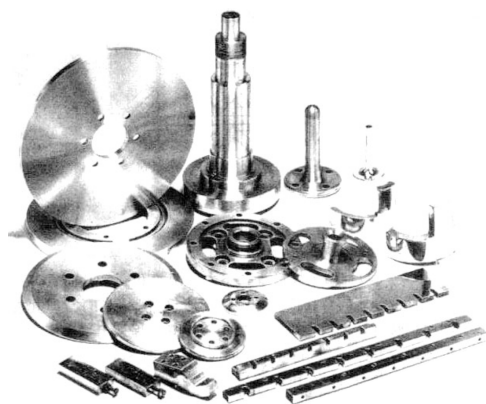


图 2-2-70 缝焊电极(含轴)实物照片

部标规定缝焊电极外径系列为 100mm、112mm、125mm、140mm、160mm、180mm、200mm、224mm、250mm、280mm 和 315mm 等,常用尺寸为 180~250mm,原则上在被焊工件结构尺寸允许的情况下,缝焊电极直径应尽可能大;厚度 B 和工作面宽度 H 与焊件的板厚 δ 有如下经验关系:平面形 $B = H = 2\delta + 2\text{mm}$;单边倒角和双边倒角形 $B = 4\delta + 2\text{mm}$, $H = 2\delta + 2\text{mm}$, $\alpha = 30^\circ \sim 60^\circ$;球面形 $\delta = 0.5 \sim 1.5\text{mm}$ 时, $R = 50\text{mm}$; $\delta = 1.5 \sim 2\text{mm}$ 时, $R = 75\text{mm}$ 。使用中允许工作宽度变化量 $\Delta H <$

10% H ，球面形则 $\Delta R < 15\% R$ 。

上述缝焊电极均采用外部注水冷却，以减小端面磨损及焊件变形。近年来为减小焊件搭边尺寸，减轻焊件结构重量、减少电极消耗、提高焊接电流密度，开始采用薄形电极，厚度仅为普通缝焊电极的 $1/3$ ，但这种电极需采用内部强制冷却方式。

(4) 对焊电极 对焊电极钳口形状、尺寸通常根据不同的焊件形状和尺寸来考虑，如图 2-2-71 所示。

V 形钳口（见图 2-2-71a）常用来焊接直径不大的圆棒和圆管，而在焊件直径较大时，为防止焊件打滑和表面烧伤应采用半圆形钳口（见图 2-2-71b），但其表面应与焊件直径的半圆周相吻合；平板形钳口主要用于板材对焊，为增大摩擦力，可用一对不导电的钢制钳口和导电钳口（电极）同时加压（见图 2-2-71d）。在焊接厚度小于 1mm 的薄板时，铜电极上面的钳口有时做成斜面形，以保证夹紧力的集中（见图 2-2-71c）。

2.5.4 点焊机器人

在我国点焊机器人约占焊接机器人总数的 46%，主要应用在汽车、农机、摩托车等行业。通常，装配一台轿车的白车身要焊接 4000 ~ 6000 个焊点，只有以机器人为核心组成柔性焊装生产线，才能完成大批量的生产纲领和适应未来新产品开发与多品种生产的发展要求，增强企业应变能力。图 2-2-72 为点焊机器人实物照片。

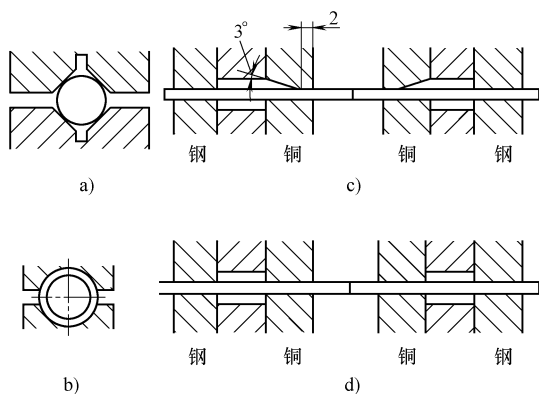


图 2-2-71 对焊电极

a) V 形钳口 b) 半圆形钳口 c) 斜面形钳口 d) 平板形钳口

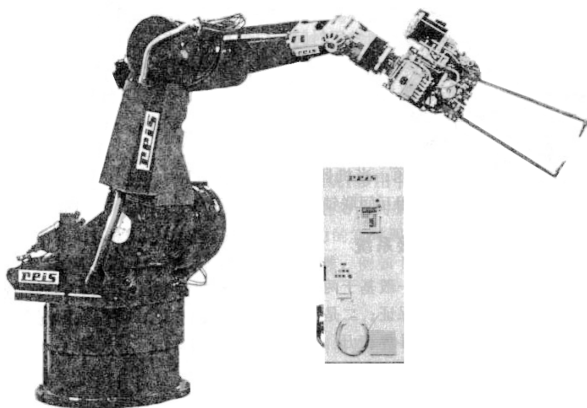


图 2-2-72 SRV—130 型点焊机器人

1. 点焊工艺对机器人的基本要求

选用或引进点焊机器人时点焊工艺对机器人的基本要求如下：

- 1) 点焊作业一般可采用点位控制（PTP），其定位精度应 $\leq \pm 0.5\text{mm}$ 。
- 2) 必须使点焊机器人可达到的工作空间大于焊接所需的工作空间，该空间由焊点位置及焊点数量确定。一般来说，该工作空间应大于 5m^3 。
- 3) 按工件形状、种类、焊缝位置选用机器人末端执行器，即垂直及近于垂直的焊缝选 C 型焊钳；水平及水平倾斜的焊缝选用 X 型焊钳。某些先进的点焊机器人，可自动更换焊钳种类和型号。
- 4) 根据选用的焊钳结构（分离式、一体式、内藏式），焊件材质与厚度及焊接电流波形（工频交流、逆变式直流等）来选取适当抓重（腕部最大负荷）的点焊机器人，通常抓重为 $50 \sim 120\text{kg}$ 。
- 5) 机器人应具有较高的抗干扰能力和可靠性（平均无故障工作时间应超过 2000h，平均修复时间不大于 30min）；具有较强的故障自诊断功能，例如可发现电极与工件发生“粘结”而无法脱

开的危险情况,并能做出电极沿工件表面反复扭转的动作直至故障消除;点焊机器人因负载大,应比弧焊机器人具有更可靠的防碰撞措施。

6) 点焊机器人示教记忆容量(控制器计算机可存储的位置、姿态、顺序、速度等信息的容量——编程容量,通常用时间或位置点数来表示)应大于 1000 点。

7) 机器人应具有较高的点焊焊接速度(如 60 点/min 以上),它可保证单点焊接时间(含加压、焊接、维持、休息、移位等点焊循环)与生产线物流速度匹配,且其中 50mm 短距离(焊点间距)移动的定位时间应缩短到 0.4s 以内。

8) 需采用多台机器人时,应研究是否选用多种型号,并与多点焊机及简易直角坐标机器人并用等问题;当机器人布置间隔较小时,应注意动作顺序的安排,可通过机器人群控或相互间联锁作用避免干涉。

2. 点焊机器人焊接系统

对点焊机器人的要求一般基于两点考虑:一是机器人运动的点位精度,它由机器人操作机和控制器来保证;二是点焊质量的控制精度,它主要由机器人焊接系统来保证,该系统由阻焊变压器、焊钳、点焊控制器及水、电、气路及其他辅助设备等组成。点焊机器人的组成如图 2-2-73 所示。

(1) 点焊钳 点焊机器人焊钳从用途上可分为 C 型和 X 型两种,通过机械接口安装在操作机手腕上。根据钳体、变压器和操作机的连接关系,可将焊钳分为分离式、内藏式、一体式三种形式。

1) 分离式焊钳:钳体安装在操作机手腕上,阻焊变压器安装在机器人上方悬梁上,且可沿着机器人焊接方向运动,二者以粗电缆连接。其优点是明显减轻手腕负荷、运动速度快、价格便宜。主要缺点是机器人工作空间以及焊接位置受到限制,电能损耗大,并使手腕承受挠性电缆引起的较大附加载荷,通水焊接电缆需要定期更换,维护费用较高。

2) 内藏式焊钳:阻焊变压器安装在操作机手臂内,显著缩短了二次电缆和变压器容量;但主要缺点是使操作机的机械设计变得复杂化。

3) 一体式焊钳:钳体与阻焊变压器集成安装在操作机手腕上,不存在挠性二次电缆。其显著优点是节省电能(约为分离式的 1/3),并避免了分离式焊钳的其他缺点;当然,它使操作机手腕必须承受较大的载荷,并影响焊接作业的可达性。无需定期更换焊接电缆,维护费用较低。

机器人点焊钳与通常所用的悬挂式点焊机不同之处主要有以下方面:

1) 具备双行程:其中短行程为工作行程,长行程为预行程,用于安放较大焊件、修整及更换电极和机器人焊接时的跨越障碍。

2) 具备扩力机构:为增加焊件厚度并减轻机器人抓重,有时在钳体的机械设计中采用扩力式气压—杠杆传动加压机构(用于 X 型焊钳)或串联式增压气缸(用于 C 型焊钳)。

3) 具备浮动装置:浮动式焊钳可以降低对工件定位精度的要求,有利于用户使用。同时,也是防止点焊时工件产生波浪变形的重要措施。浮动机构主要有弹簧平衡系统(多用于 C 型焊钳)或气动平衡系统(多用于 X 型焊钳的浮动气缸)。

4) 新型电极驱动机构:近年出现的电动及伺服驱动加压机构即伺服焊钳,可实现电极加压软接触,并可进行电极压力的实时调节。在与焊接电流实时最佳配合后,显著提高点焊质量和减少点焊飞溅,例如 MOTOMAN 点焊机器人上所配置的伺服焊钳。

(2) 点焊控制器 用于点焊机器人焊接系统中的点焊控制器是一相对独立的多功能点焊微机

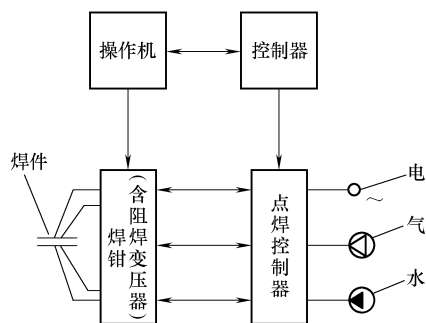


图 2-2-73 点焊机器人组成框图

控制装置,可实现以下功能:

- 1) 点焊过程时序控制,顺序控制预压、加压、焊接、维持、休止,每一程序周波数设定范围为0~99(误差为0),如图2-2-74所示。
- 2) 可实现焊接电流波形的调制,且其恒流控制精度在1%~2%。
- 3) 可同时存储多套焊接参数。
- 4) 可自动进行电极磨损后的阶梯电流补偿、记录焊点数并预报电极寿命。
- 5) 具有故障自检功能,对晶闸管超温、晶闸管单管导通、变压器超温、计算机、水压、气压、电极粘结等故障进行显示和报警,直至自动停机。

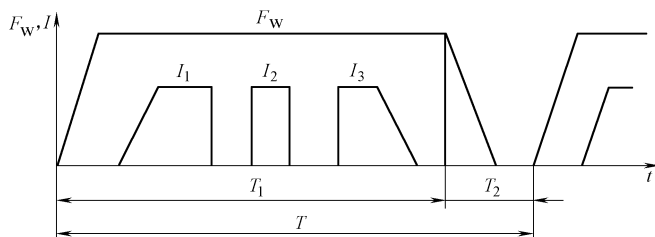


图 2-2-74 点焊机器人焊接循环

T_1 —焊接控制器控制 T_2 —机器人主控计算机控制

T —焊接周期 F_w —电极压力 I —焊接电流

- 6) 可实现与机器人控制器及示教盒的通信联系,提供单加压和机器人示教功能。
- 7) 断电保护功能,系统断电后内存数据不会丢失。

点焊控制器与机器人控制器相互关系主要有以下3种结构形式:

1) 中央结构型:它将点焊控制器作为一个模块安装在机器人控制器内,由主计算机统一管理并为焊接模块提供数据,焊接过程控制由焊接模块完成。这种结构的优点是机器人控制器集成度高,便于统一管理。

2) 分散结构型:点焊控制器与机器人控制器分开设置,二者采用应答式通信联系。主计算机给出焊接信号后,其焊接过程由焊接控制器自行控制,焊接结束后给主计算机发出结束信号,以便机器人移位,如图2-2-74所示。这种结构的优点是调试灵活,焊接系统可单独使用;但需要一定距离的通信,且用户要考虑点焊控制器与机器人控制器之间的接口问题,集成度不如中央结构型高。

(3) 群控系统 将多台点焊机器人焊机与群控计算机相联,以便对同时通电的数台焊机进行控制。实现部分焊机的焊接电流分时交错,限制电网瞬时负载,稳定电网电压,保证点焊质量。为此,点焊机器人焊接系统都应增加“焊接请求”及“焊接允许”信号,并与群控计算机相连。

近年美国 WTC/MEDAR 公司推出的以太网编程器(数据输入板)EDEP有两种规格:第一种用于一对一在控制器局域以太网接口上编程和收集数据;第二种用于接在工厂以太网网络上进行操作。焊接控制器上的局域以太网接口和串行接口也可用手提计算机进行操作。焊接网关软件是一个网络资源工具,当安装在PC机上并连接到广域以太网后,操作者可以监视处于同一网络上的各组焊接控制器的状态并收集数据,接口界面的设计使操作者能快速浏览网络并看到哪台焊接控制器发生了故障、报警或已离线。焊接网关软件能监视和收集它能看到焊接控制器的数据,及时更新状态的变化和向操作者提示故障内容。

目前,机器人点焊控制器正向智能化方向迅速发展,主要表现在以下方面:

- 1) 改进传统的人机操作模式,提供友好的人—机对话界面。
- 2) 根据所焊接材料的材质、厚度、焊接电流波形(即焊机类型),研制集成专家系统(ES)、

人工神经网络（ANN）、模糊技术（Fuzzy）等诸多人工智能方法相混合的点焊工艺设计与接头质量预测的智能混合系统，偏重于软件方面实现机器人点焊质量控制；基于多传感器信息融合技术（如基于多传感器信息融合的智能 PID 控制、Fuzzy—PID 控制等），偏重于硬件方面实现机器人点焊多参数联合质量控制。

部分国内外生产的点焊机器人列于表 2-2-68。

表 2-2-68 点焊机器人

型号	自由度	结构形式	额定负载/N	驱动方式	重复精度/mm	动作方式	示教方式	编程容量	生产厂商
MOTOMAN—SK120	6	关节型	1200	AC	±0.4	PTP、CP	示教盒， 离线编程	2200 步，1200 条顺序指令	首钢莫托曼机器人有限公司，日本安川（株）
SRV 130			1300		±0.2			3500 ~ 8000 点	德国莱斯（REIS）机床制造公司
IRB6000/150			1500		±0.5			存储 64kB、2500 点	瑞典 ABB 工业自动化工程有限公司
IR761/125			1250		±0.3			存储 256kB	德国库卡（KUKA）公司
RD120			1200		±0.4		示教盒	3000 步	沈阳新松机器人自动化股份有限公司

3. 点焊机器人的应用

由于汽车焊接结构比一般机械产品更为复杂、装焊过程难度高、生产批量大，特别是轿车车身制造一直是高新技术应用相对集中的行业，其核心主要是由大量焊接机器人和计算机控制的自动化焊装设备所组成的车身焊装生产线（Welding Assembly Lines）。近年来，国内的大型轿车制造厂几乎都采用了焊接机器人车身焊装线，其中几家已体现了世界先进技术水平，在这些机器人中，点焊机器人所占比重最大。例如，一汽大众汽车有限公司焊装车间捷达（Jetta A2）白车身装焊自动生产线上就有 60 余台点焊机器人在工作。图 2-2-75 是某轿车白车身焊装线。

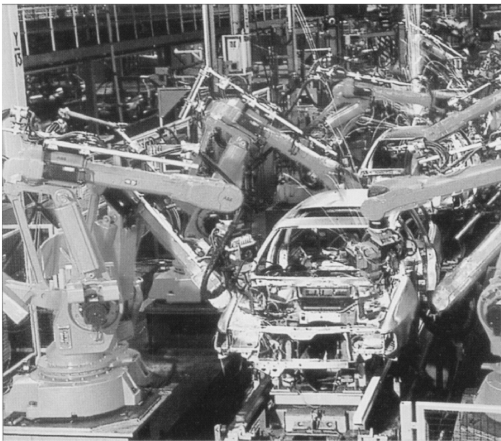


图 2-2-75 某轿车白车身焊装线

目前，汽车车身制造技术的最高水平，整个车间全部由点焊机器人、弧焊机器人、专门负责上下物料的搬运机器人，以及各种传送链、自动焊装夹具组合成无人、全动车身车间（又称无人化车间），实现了车身装焊的全线“柔性化”。生产方式则为多品种、大批量混流生产。完全适应了现代大规模、多品种、大批量的生产方式，降低了成本，可有力地支撑本公司生产的汽车参与市场竞争。国外年产 30 万辆以上的车身制造厂几乎都采用这种模式。

2.6 电阻焊技术的新发展

电阻焊被广泛应用于航空、航天、能源、电子、车辆及轻工等行业制造领域，为了适应新材料、新工艺、新产品在工业上开发应用的需要，近年来，国内外在电阻焊接头形成机理、新材料焊接性、焊接过程数值模拟等方面做了大量的基础研究；同时，在电阻焊新工艺及新设备、焊接质量监控技术、电阻焊生产线的集成化、柔性化等方面也进行了技术和产业的开发工作。

2.6.1 电阻焊接头形成理论研究进展

电阻焊接头形成理论研究为电阻焊新材料、新工艺、新设备、接头质量监控技术等发展创造了条件。因此,它不仅具有较高的学术理论意义,也有很大的工程实用价值。

1. 点焊熔核孕育处理

国内学者赵熹华等人,在国家自然科学基金和美国 GM 基金资助下对多种难焊金属材料(铝合金、弹簧钢等)开展了“点焊熔核孕育处理理论与方法”的研究(美国发明专利 United States Patent: US20050103406A1),现已取得如下成果:

- 1) 首次获得了全部凝固组织为等轴晶的点焊熔核(见图 2-2-76b)。
- 2) 首次使全部为柱状晶的点焊熔核贴合面处出现等轴晶区(见图 2-2-77b)。
- 3) 扩大熔核等轴晶区,缩小熔核柱状晶区,使凝固组织晶粒显著细化。



图 2-2-76 2Al2-T4 铝合金点焊熔核

a) 未经孕育处理(柱状晶+等轴晶) b) 经过孕育处理(等轴晶)

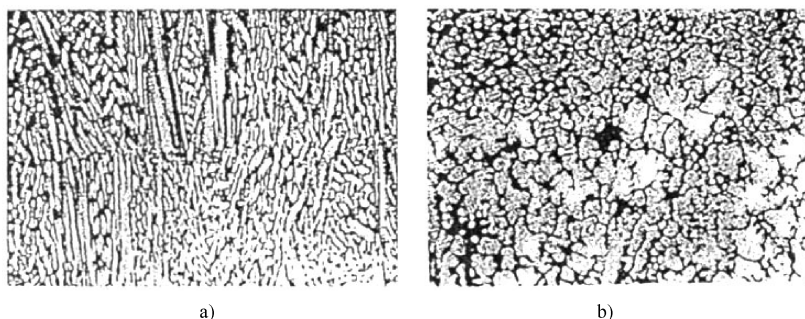


图 2-2-77 65Mn 弹簧钢点焊熔核

a) 未经孕育处理(柱状晶组织及贴合面) b) 经过孕育处理(贴合面处的等轴晶组织)

研究表明,孕育处理可显著提高点焊接头力学性能,尤其是疲劳强度对焊接性较差的材料(AA2024—T4、AA6111—T4 等)尤为明显。这就为点焊质量监控技术开辟了一条新路,从“质”的方面根本改善了点焊接头质量。

有报道称,采用外加径向恒定磁场,可影响熔核内部液态金属的运动和结晶过程,改变结晶类型(柱状晶→柱状晶+等轴晶),细化晶粒并减少缩松、裂纹等宏观缺陷出现的几率,这就提高了接头的力学性能,在高强度钢点焊中效果显著。

有报道称,在铝合金板两面分别镀不同厚度的铬酸盐层,可减小电极的接触电阻,降低接触面上的加热程度,同时使铝板之间的接触电阻相对增大,加速熔核形成,保证了接头的性能,并提高电极寿命。

2. 电阻焊过程的数值模拟

数值模拟技术可灵活地对电阻焊过程中的各种影响因素进行研究,帮助人们进行一些不可能通

过试验而完成的研究和分析,从而为电阻焊研究提供理论上的指导。其中点焊接头形成过程的数值模拟研究一直是该领域科学研究发展的重要方向。目前的研究主要集中在点焊过程中的热、电、力行为及相互耦合作用结果,即根据物理学中描述热、电、力问题的基本方程,通过对方程中参数变化和边界条件进行假设,建立点焊过程的数学模型,进而用数值方法对点焊过程的温度场、电流场、电势场和应力、应变场进行求解,用以研究点焊过程机理。电阻焊过程数值模拟研究进展见表 2-2-69。

表 2-2-69 电阻焊过程数值模拟研究进展

电阻焊类型	时间(年)	研究者	数值方法	特 点
点焊	1999	王春生 ^① (中国)	三维有限差分模型	异质材料(1Cr18Ni9Ti-08F)点焊热、电耦合行为分析,电磁效应(MHD)行为影响
	2000	Jamil. A. Khan(美国)	三维热模型	铝合金点焊,该模型没考虑接触面在点焊过程中变化及变形对热、电分析的影响
	2002	李宝清 ^② (中国)	轴对称有限元模型(ANSYS)	铝合金点焊,热、电、力耦合行为分析,考虑了接触压强和温度等对接触电阻影响
	2004	杨黎峰 ^③ (中国)	轴对称有限元模型(ANSYS)	铝合金点焊熔核行为及孕育处理机理研究
	2008	A. Eder(奥地利)	轴对称有限元模型(SORPAS)	6000 系铝合金电阻点焊进行热、电、力耦合行为分析,对热裂纹的生成及防止进行预测
	2008	I. R. Nodeh(伊朗)	轴对称有限元模型(ANSYS)	模拟了碳钢电阻点焊接头残余应力
	2009	唐新新 ^④ (中国)	轴对称有限元模型(SYSWELD)	铝合金点焊组织模拟
	2009	孙芳芳(中国)	轴对称有限元模型(ANSYS)	不锈钢(201)点焊过程温度场和应力场模拟
	2009	王敏(中国)	轴对称有限元模型(SORPAS)	高强度双相钢(DP590)点焊熔核形成过程及焊接热输入的影响等
闪光对焊	2003	王维斌(中国)	轴对称有限元模型(ANSYS)	超细晶粒钢直流闪光对焊,热、电耦合模型考虑了接触电阻与闪光烧损对产热的影响,热、力耦合模型考虑了钢粘塑性接触问题;模拟了接头奥氏体晶粒长大过程
	2008	徐小帆(中国)	三维有限元模型(ANSYS)	钢轨闪光对焊温度场分析,采用“生死”单元技术对闪光烧损进行处理,模拟了工艺关键参数对闪光过程的影响
缝焊	2009	李永强 ^⑤ (中国)	三维面对称有限元模型(ANSYS)	铝合金电阻缝焊热、电、力耦合行为分析,考虑了接触电阻随接触压力及温度的变化关系

① 国家自然科学基金资助项目(59875033)。
② 国家自然科学基金资助项目(50045019)。
③ 国家自然科学基金资助项目(50175048)。
④ 国家自然科学基金资助项目(50575159)。
⑤ 国家自然科学基金资助项目(50575091)。

杨黎峰根据计算流体力学与传热学原理,建立了描述铝合金电阻点焊液态熔核流动行为和传热过程的轴对称有限元模型。模型中考虑了移动边界层内部液态金属的对流传热和层外固体导热、材

料热物理性能参数和接触电阻随温度的变化、焊件表面通过对流和辐射周围环境的散热、球面电极传热以及熔化/凝固相变潜热对熔核形成热过程的影响,并采用有限元法对铝合金点焊熔核形成过程温度场和流场分布进行了数值计算。计算结果表明,强烈的对流位于熔核中心沿轴线附近区域,其流速最大值数量级为 $1 \times 10^{-1} \text{ mm/s}$;在直流焊接条件下,5ms 时间内开始形成液态熔核,并迅速沿轴向和径向扩展;回流环速度矢量将能量从熔核中心通过对流传热方式传递到熔核边缘,降低熔核内部的温度梯度,促进熔核生长。试验表明,计算结果与实测值吻合良好,如图 2-2-78 ~ 图 2-2-82 所示。

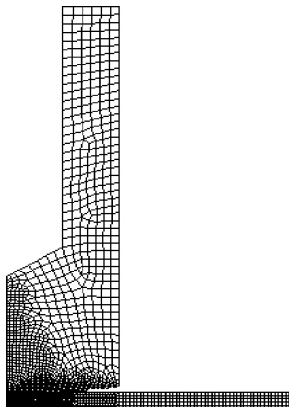


图 2-2-78 模型的非均匀有限元网格

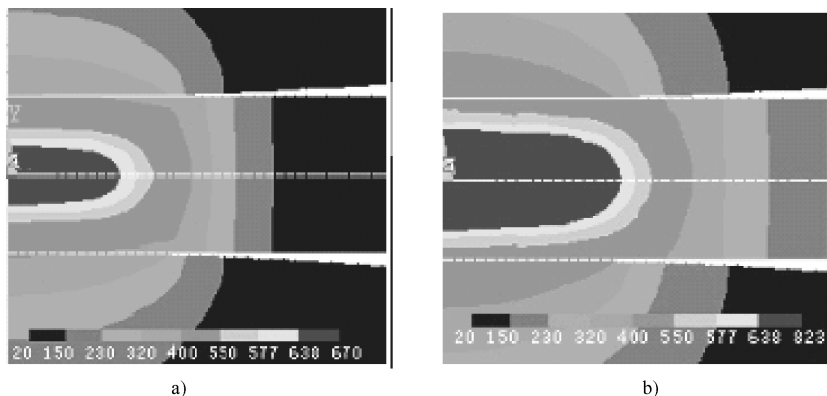


图 2-2-79 不同时刻焊接区温度场分布 ($T/^{\circ}\text{C}$)

a) 20ms b) 60ms

在对不等厚铝合金板电阻点焊热过程有限元分析中,还要考虑帕尔帖效应的影响,以寻找改善熔核偏移的措施。例如采用 TZ-3 $\times$ 63 直流焊机点焊 AA5182-0,板厚 1mm + 2mm 时,薄板在与不同极性电极接触时,温度场数值计算结果如图 2-2-83 所示,其中图 2-2-83a 所示为薄板与负电极一侧相接触区温度场分布,图 2-2-83b 所示为反相焊接情况。从图中可以看出,在焊接参数相同的条件下,前者较后者有更为严重的熔核偏移。因此,在铝合金直流点焊中,对于不等厚板的焊接,合理利用帕尔帖效应可以改善熔核的偏移,以提高焊点的质量。图 2-2-84 为数值计算与工艺

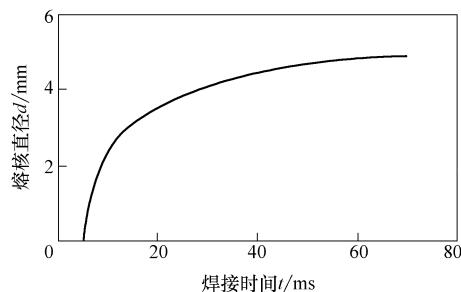


图 2-2-80 熔核尺寸随时间的变化

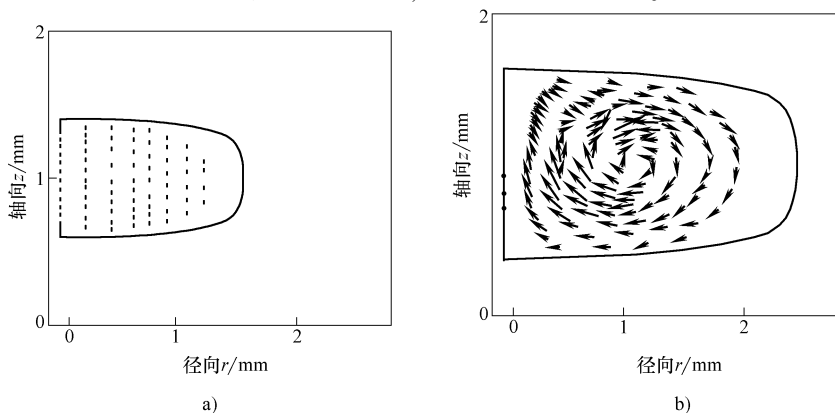


图 2-2-81 熔核速度场分布

a) 20ms b) 60ms

试验结果对照。

揭示铝合金点焊过程温度场和流场的分布规律，其结果有助于更好地了解焊接过程中熔体的运动状态、凝固组织细化和产生缺陷的原因，为正确选择点焊焊接参数等提供理论指导。

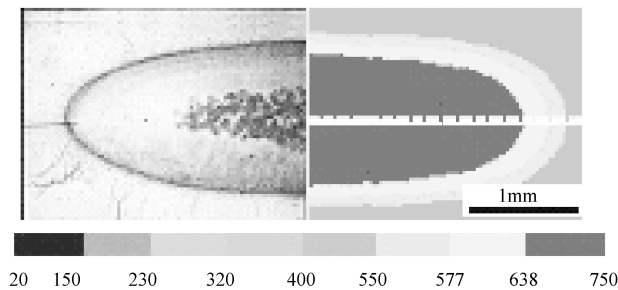
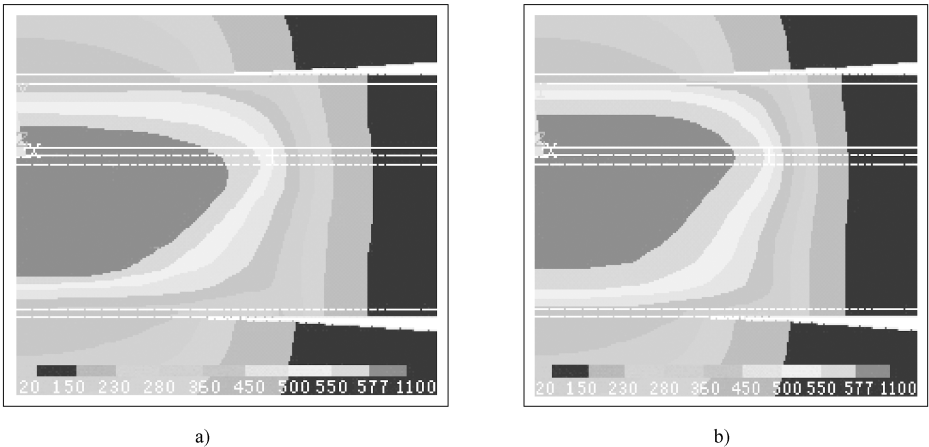


图 2-2-82 40ms 时数值计算与试验结果对照 ($T/^{\circ}\text{C}$)



a) 薄板与正电极接触 b) 薄板与负电极接触

图 2-2-83 薄板与不同电极接触时温度场分布 ($T/^{\circ}\text{C}$)

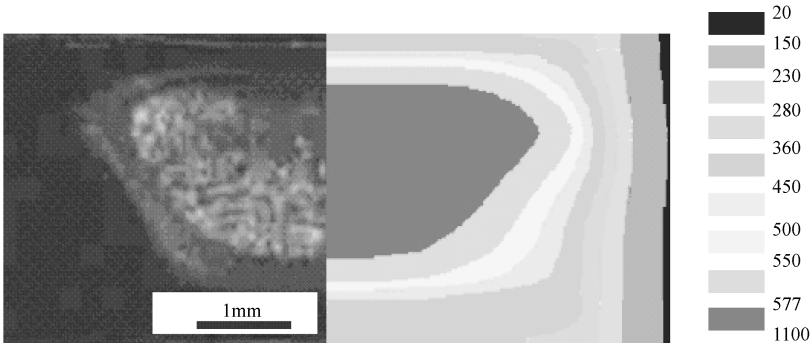


图 2-2-84 数值计算与试验结果对照 ($T/^{\circ}\text{C}$)

提高数值模拟的精度，使其结果更接近于实际焊接情况，就要对模拟模型进行评估，目前常用贝叶斯定理统计策略来分析模拟计算的误差范围，但是，在输入量和未知参数多、数据量大的情况下，统计分析变得相当困难；Hasselman、Timothy 等学者在用电-热-力有限元模型分析铝合金电阻点焊过程，计算熔核尺寸和表面压痕时，采用基于不确定模型方法的主元素法，通过对熔核尺寸和压痕统计的线性均方差得到有限元的预测精度。

计算机数值模拟有成本低、参数改变灵活、方便等优点,但目前大部分都用于离线计算和模拟,如何将这种方法有效地应用到工业生产中对焊接质量进行在线评估和控制,也成为近年研究的一个重点。丹麦学者 Zhang Wenqi 基于长期的工程研究和工业合作,开发了一个新的基于有限元方法的焊接软件 SORPAS,用于模拟电阻凸焊和点焊过程。为了使该软件能被工厂中的工程师直接应用,电阻焊中的所有参数均被考虑并自动地在软件中实现。该软件支持 Windows 友好界面,操作灵活,对工件及电极可灵活地进行几何形状设计,参数设置犹如正式焊机,它可用于工业中支持产品开发和工艺优化。现在 Volkswagen、Volvo、Siemens 和 ABB 等公司都开始采用此软件;美国华盛顿大学的 Li Wei 提出了一个基于接触区域的点焊质量评估模型,它是用一个有限元分析模型来表示接触区域变化,根据模拟结果进行在线应用,经试验:在不同的电极尺寸、电极力、焊接时间和电流下这种方法是成功的,它将为电阻焊监测和控制提供重要的信息。

3. 新型工业材料焊接性研究

新型工业材料—镀锌钢板和铝合金等在汽车工业中获得了大量应用,但由于其物理性能上的特殊性,其点焊焊接性很差,尤其是点焊过程中电极的磨损和沾污,严重影响了连续点焊生产。而小焊点和粘焊等缺陷又使点焊接头的力学性能和可靠性没有保障,尤其是铝合金更为严重。因此,必须对这些材料的点焊焊接性做进一步深入细致的研究。

(1) 镀锌钢板焊接性研究 主要集中在以下方面:

- 1) 镀层涂覆方法(电镀锌、热镀锌、热镀 Zn-Fe 合金、Zn-Ni 合金)及镀层厚度影响。
- 2) 镀层与电极头之间相互影响,法国学者 T. Dupuy 对电极端部损坏作了专题研究。
- 3) 熔核结晶形态、缺陷产生机理、力学性能等与点焊焊接参数的关系等。
- 4) 以信息和控制新技术对点焊工艺和过程进行模拟和预测。

随着汽车轻量化发展,高强度镀锌钢板的使用越来越广泛,取代普通的冷轧钢板已经成为必然的趋势,常用的基板为 DP 钢、TRIP 钢、CP 钢等高强度钢板,镀层也正由电镀锌(含合金锌)向热镀锌(含合金锌)转移。因此,高强度镀锌钢板点焊研究已成为镀锌钢板焊接性研究中的最新热点:焊点力学性能及宏观断裂方式研究;焊点尺寸及微观组织的研究;点焊工艺优化研究;高强钢点焊过程有限元分析等。

例如英国 TWI 的 Shi G 研究了高强度钢点焊程序的修正以及母材强度和焊接淬火对焊点性能的影响;日本学者 Otani、Tadayuki 等对超细晶粒高强钢电阻点焊特性做了系统的研究,研究发现:由于高强钢在高温下的电阻率和强度与低碳钢不同,其点焊时得到同样大小的熔核尺寸需要的焊接电流比低碳钢板更大,同时,这种钢板的碳当量很低,虽然焊后熔核的主要组织是马氏体,但由于低碳成分限制了熔核硬化,因此这种材料的点焊接头不经过回火就能得到高的抗剪强度和抗拉强度;法国学者 Mimer 通过试验研究提出了通过焊后回火工艺来改进高强钢和超高强度钢的电阻点焊性能的方法;日本学者 Sakuma、Yasuharu 还对高强镀锌钢板的点焊焊接性进行了研究。

(2) 铝合金板焊接性研究 主要集中在以下方面:

- 1) 电极粘结和喷溅产生机理及解决措施。例如,铝合金点焊中飞溅的小波分析研究;在铝合金板两面分别镀不同厚度的铬酸盐层,改变接触电阻大小的效果研究等。
- 2) 铝合金电阻点焊过程的数值模拟及能量分析等。
- 3) 铝合金点焊工艺设计及质量控制的智能化研究。
- 4) 中频逆变、二次整流、电容储能焊机在铝合金点焊中的应用。

2.6.2 电阻焊新工艺

1. 精密脉冲电阻对焊

精密脉冲电阻对焊工艺可解决形位尺寸要求严格、焊接性差和接头性能有特殊要求的精细零件

对焊。

其工艺特点如下：

(1) 采用调制焊接压力 通过由直流电磁铁为核心的电磁加压机构实现，使顶锻开始时间和顶锻力准确、及时。

(2) 采用调制电流脉冲 焊接脉冲 + 后热处理脉冲，后热处理脉冲可为单脉冲、双脉冲及多脉冲。

(3) 调制焊接压力与调制电流脉冲可适当配合 组成最佳精密脉冲对焊焊接循环，如图 2-2-85 所示。

该工艺可较好地实现记忆合金（TiNi）、可淬硬合金以及热物理性质相差较大的异种金属的对焊。

2. 微电阻点焊

随着微连接技术的发展，微电阻点焊也成为 IT 制造业关注的热点，其技术特点如下：

1) 工件尺寸很小，接头组成中至少有一个工件厚度或直径小于 0.1mm，且材质往往特殊或有涂层（Au、Ag、Ni、漆）。

2) 微电阻点焊机（有文献称为显微点焊机）结构上具有显微光学放大装置（体视显微镜等）；有阶梯波的输出脉冲电流（有闭环负反馈电路），焊接输出能量波动 $\pm 0.5J$ 。

3) SW（Stripping-welding）焊头以平行间隙焊（又称平行微隙焊，Parallel Micro Gap Welding）形式实施焊接。

SW 微电阻电子点焊机如图 2-2-86 所示。

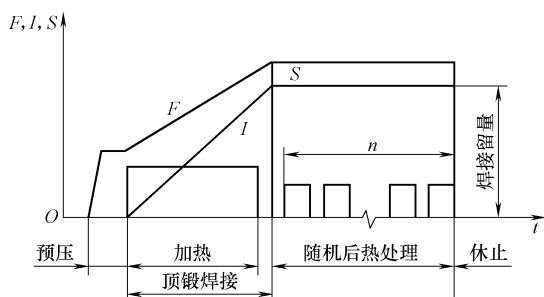


图 2-2-85 TiNi 记忆合金精密脉冲对焊原理

F —压力 I —电流 S —位移

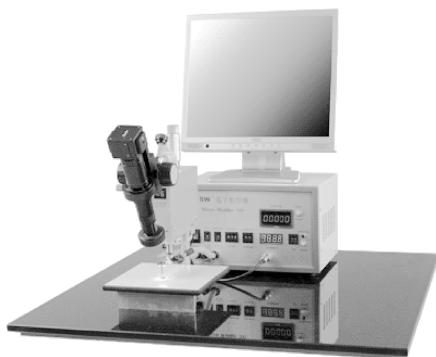


图 2-2-86 SW 微电阻电子点焊机

3. 电阻熔丝焊

电阻熔丝焊（又称电接触熔丝焊）可用于车辆、矿山及动力、特种机械设备等曲轴、凸轮轴、转子及传动齿轮轴等的修复，修复成本与电弧堆焊相比，为后者 $1/3 \sim 1/2$ 。

其方法特点如下：

1) 基本原理与电阻缝焊相同，如图 2-2-87 所示。焊接过程如下：

零件表面清理→无损检测（涡流和磁粉表面探伤）→焊接表面机械加工（磨平或抛光）→电阻熔丝焊→机械加工→无损检测（涡流和渗透探伤）。

2) 零件材料可为铸铁、碳钢、合金钢和耐腐蚀钢等，零件直径大于 10mm，焊层厚度 0.5 ~ 5mm，硬度 20 ~ 60HRC。

3) 根据修复零件种类（形状和尺寸），选用电阻熔丝焊设备或在车床的基础上组装焊接装置。图 2-2-88 为 Y3H—01 型电阻熔丝焊机，其铭牌数据如下。

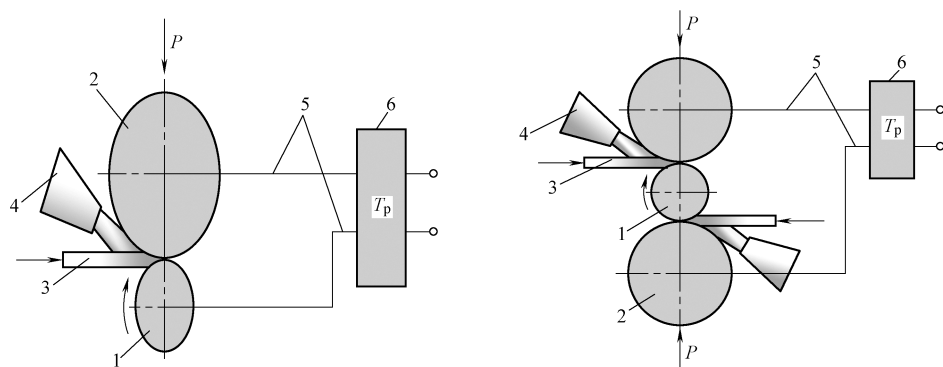


图 2-2-87 电阻熔丝焊的基本原理

1—零件 2—滚轮电极 3—熔焊丝 4—冷却液进给 5—焊接回路 6—阻焊电源

使用功率： $<50\text{kVA}$ ；

工业用水量： $0.25 \sim 0.4\text{m}^3/\text{h}$ ；

加压机构：气动（ $0.2 \sim 0.4\text{MPa}$ ）；

熔丝直径： $<2\text{mm}$ ；

强化层厚度： $1.3 \sim 1.8\text{mm}$ 。

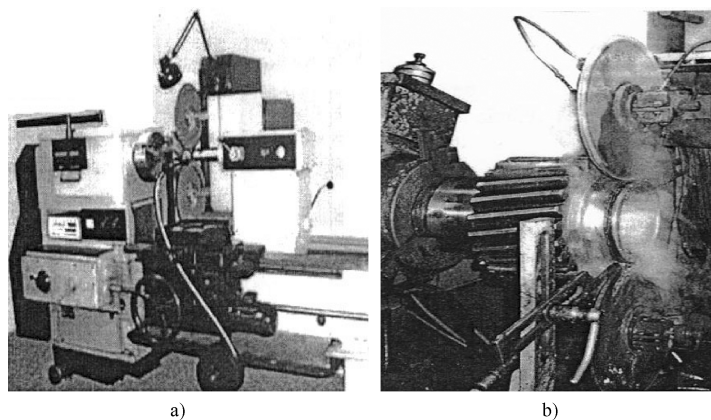


图 2-2-88 Y3H—01 型电阻熔丝焊机

a) 焊机 b) 加工现场

4. 激光束-高频焊（LB-HFRW）复合焊接

LB-HFRW 是在高频焊管的同时，采用激光束对尖劈（汇合点）进行加热（见图 2-1-5），从而使尖劈在整个厚度方向上加热更均匀，这有利于进一步提高焊管的生产率和质量。

5. 激光束-电阻缝焊（LB-RSW）复合焊接

具备高速、低变形、柔性化特征的激光焊（LBW）技术被认为是 21 世纪最具有发展潜力的焊接方法。但是激光器功率等级、装配条件（装配间隙、错边、不等厚度等）、过程控制（焦点波动、光束对中等）、材料的高反射率（铝、镁及其合金）等诸多因素限制了激光焊的工程实用范围。因此，希望利用其他焊接方法的特点来弥补激光焊不足的复合焊接技术就成为研究重点。目前与激光焊相关的复合焊接方法已有 LB-TIG、LB-MIG、LB-PAW 和 LB-FSW 等，并在工程实际中获得初步推广应用。2003 年吉林大学赵嘉华教授首先提出了“激光束-电阻缝焊（LB-RSW）”复合焊接方法并实现了原理性试验，在美国 GM 基金和国家自然科学基金资助下进行了全面系统研究，主要成果申报了国际发明专利（专利号：PCT/WO2007008363A2），并获得美国发明专利 US7 718 917B2。

众所周知，电阻缝焊（RSW）技术的显著特点为焊缝是在热-机械（力）作用下形成的。加热（含预热和缓冷）可以提高金属材料对激光的吸收率、降低所需激光功率；同时，加热、缓冷和加压可以调节焊接温度场和应力场，改善焊缝结晶条件、调节晶粒大小及分布，减少气孔、热裂纹和接头残余应力等；特别是加压可以消除装配不良导致的错边和板间间隙，避免了成形不良和产生板间流淌形成的焊瘤。

（1）复合焊接系统 复合焊接系统如图 2-2-89 所示。

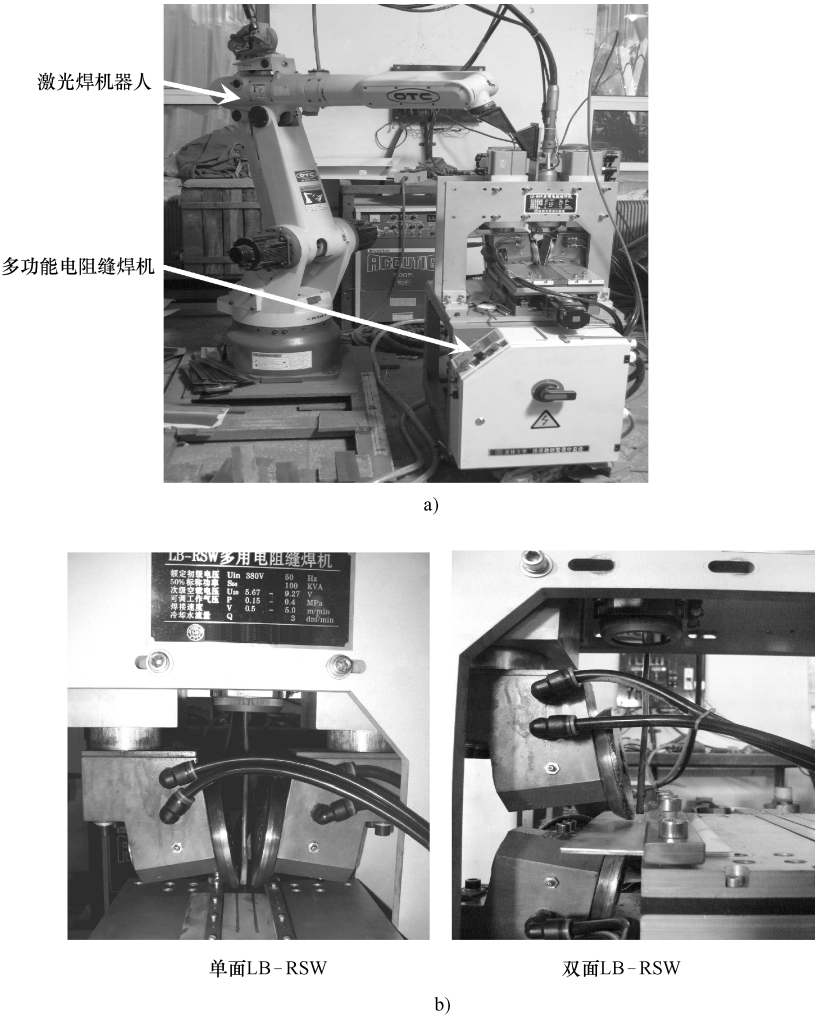


图 2-2-89 复合焊接系统

a) 复合焊接试验系统 b) 工作台

（2）复合焊接工艺

- 1) 在激光焊参数相同的条件下，LB-RSW 的焊接熔深大于单独 LBW 的焊接熔深，且随着 RSW 焊接电流的增加而增大。
- 2) 在激光焊参数相同的条件下，LB-RSW 的焊接接头拉剪力大于单独 LBW 焊接接头的拉剪力，且随着 RSW 焊接电流的增加而增大。因此 LB-RSW 复合焊新方法可比传统的激光焊（LBW）更具有节能高效的特征，如图 2-2-90 和图 2-2-91 所示。

3) LB-RSW 与 LBW 焊缝熔合线附近和焊缝中心组织对比如图 2-2-92 所示。从图 2-2-92 中可以看出,有、无电流的焊缝组织都是由熔合线附近的柱状树枝晶和焊缝中心的等轴树枝晶组成;在相同焊接速度下,增加 RSW 电流的焊缝组织比无电流(LBW)时粗大一些;高速 LB-RSW 与单独 LBW 的组织并无明显区别。

对比 LB-RSW 与单独 LBW 焊缝横截面,两种方法得到的焊缝中除有少量气孔外没有其他缺陷,其中 LB-RSW 焊缝中的气孔略少于 LBW 焊缝中的气孔。

(3) LB-RSW 复合焊接数值分析 使用 Pro/E 和 Ansys 软件建立 3D 有限元模型,并用 Ansys 的二次开发实现了 RSW 过程的热、电、力耦合分析,探讨了 LB-RSW 复合焊接中 RSW 温度、电流的分布规律,为 LB-RSW 的机理研究奠定了基础。铝合金板的温度场和电流场的模拟结果如图 2-2-93 所示。

(4) 温度场的热成像测量 使用红外热成像技术可以测量 LB-RSW 中 RSW 的温度场,进而为 RSW 过程的温度场和电流场数值模拟结果提供验证和评价。铝合金板和碳钢板的温度场热成像照片如图 2-2-94 所示。

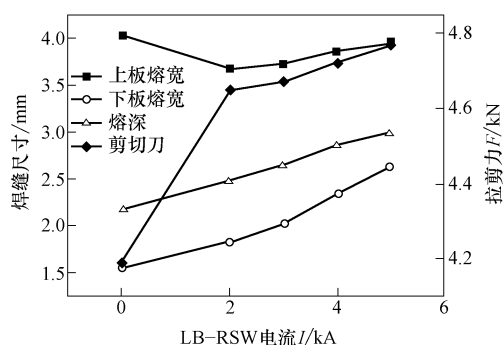


图 2-2-90 焊接电流对 LB-RSW 焊缝成形尺寸和拉剪力影响
(焊接电流为 0 时即为单独的 LBW)

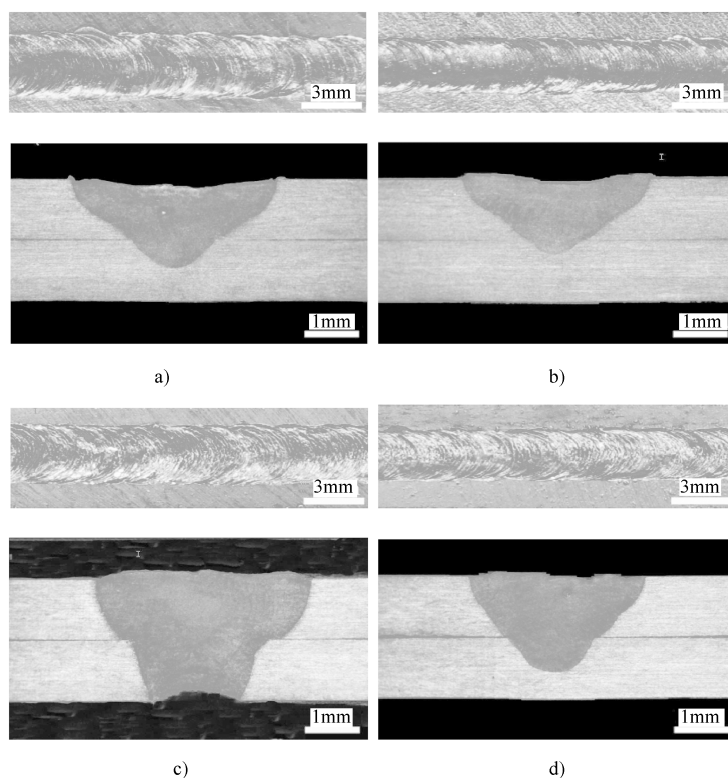


图 2-2-91 LB-RSW 与 LBW 的加工能力对比

a) 0A, 0.8m/min b) 0A, 1.2m/min c) 5kA, 0.8m/min d) 5kA, 1.2m/min

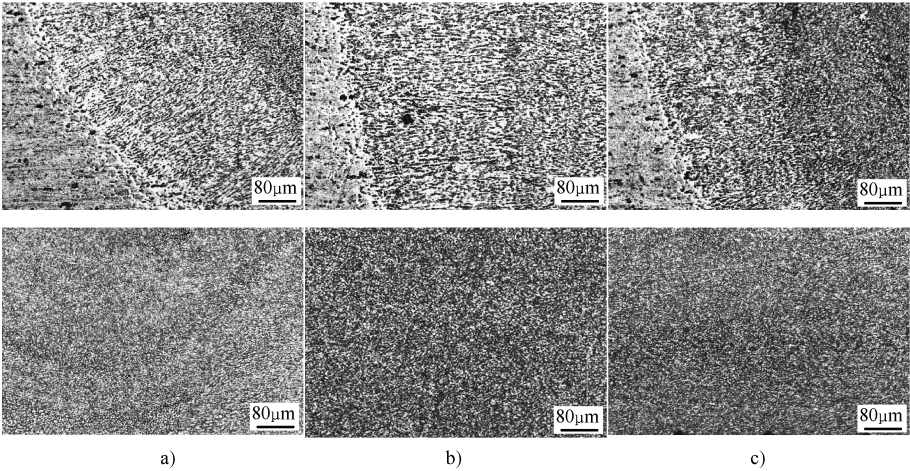


图 2-2-92 LB-RSW 与 LBW 熔合线附近和焊缝中心组织对比
a) 0A, 0.8m/min b) 5kA, 0.8m/min c) 5kA, 1.2m/min

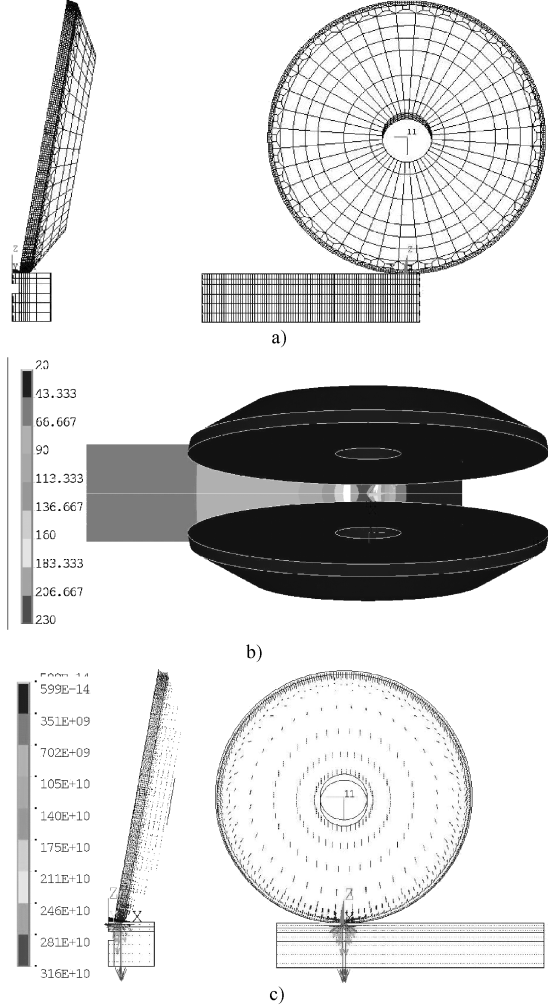


图 2-2-93 数值模拟的 RSW 温度场和电流场
a) 1/2 面对称有限元网格 b) 温度场云图 c) 电流密度矢量图

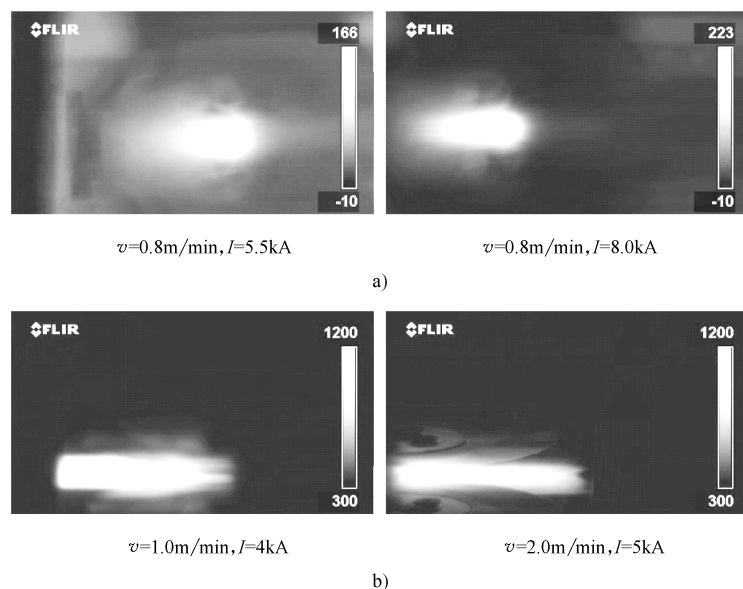


图 2-2-94 RSW 热成像照片
a) 5182-O 铝合金板 b) St14 钢板

2.6.3 电阻焊新设备

二次整流电阻焊机和逆变式电阻焊机是当今世界电阻焊机发展的主要方向。随着现代控制理论与电子元器件发展，其技术关键（低电压大电流给二次整流带来难度；控制的可靠性和精确性要求更高等）已基本解决。

目前，逆变式电阻焊机是优先发展的热点。据统计，日本的 Mijachi、Seiwa，欧洲的 Messer、Tecna，北美的 TJ Snow，韩国的 Taesung，中国的天津七〇七所及天津商科数控设备有限公司等已有容量 400kVA 以下的该类焊机产品。图 2-2-95 为逆变式电阻焊机原理示意图。

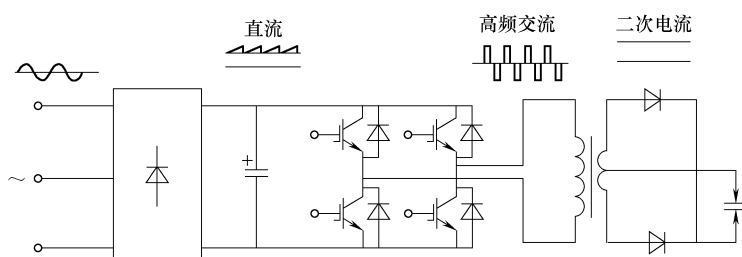


图 2-2-95 逆变式电阻焊机原理示意图

逆变式电阻焊机具有以下特点：

- 1) 响应速度快，控制精度高：由于采用较高的逆变频率（600 ~ 4000Hz，通常为 600 ~ 1600Hz），时间调节和反馈控制周期在 1ms（在 1000Hz 时）以内，大大提高了焊接电流控制精度。
- 2) 体积小，重量轻：由于采用中频的工作频率，在相同的功率输出时焊接变压器体积和重量明显减小，据报道，采用逆变式的一体式焊钳其重量可减轻 50%。
- 3) 三相负载平衡，功率因数高，节能。
- 4) 工艺优势明显：焊接电流为脉动直流（且波纹度小），无交流过零不加热工件的缺点，热

量集中能焊接各种材料。同时,电极寿命获得延长。例如,逆变式电阻焊机的焊接回路受铁磁物质影响很小(见图2-2-96);焊点形成稳定熔核的电流范围广(见图2-2-97、图2-2-98),因为电流极小的脉动使电极和工件接触部位的温度变化小、热效率高。同时,逆变直流无尖峰电流,因而在熔核形成的过程中不易产生飞溅,从而使得允许的电流上限扩大。实验表明:在焊接电流有效值相同的条件下,逆变直流的动态电阻比交流点焊时大33%,故焊点的发热量大,熔核形成速度较快,允许的电流下限较小。美国实利公司采用交流和逆变点焊在汽车钢板上焊接,对照得出逆变点焊比交流点焊节能27%的结论。逆变直流点焊获得稳定的熔核尺寸的焊接电流范围宽,这一特性对焊接有镀层的钢板(如镀锌板)、锆等有色金属尤为有利。

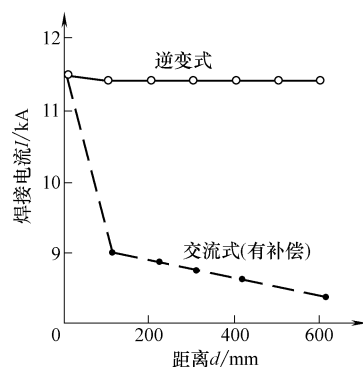


图 2-2-96 逆变焊机与交流焊机随工件插入焊接回路距离的电流变化

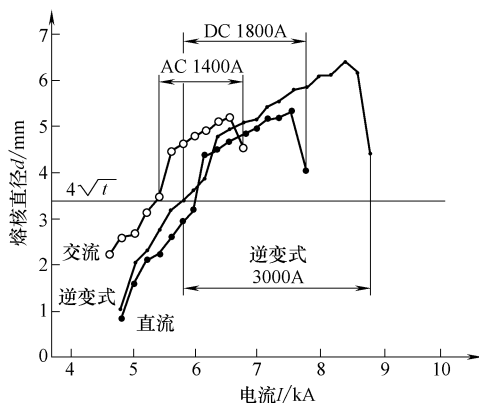


图 2-2-97 点焊时三种电源的电流范围比较（低碳钢）

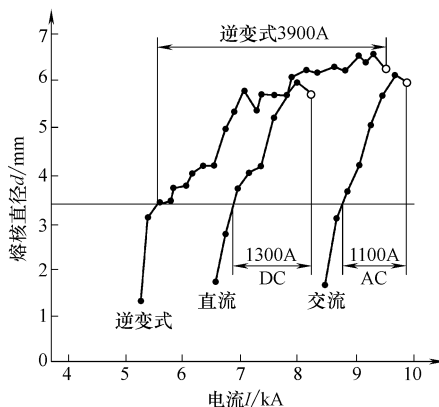


图 2-2-98 点焊时三种电源的电流范围比较（镀锌板）

目前,逆变式电阻焊机要继续深入研究的主要问题有以下方面:

1) 大功率开关元件的不断更新。IGBT(双极型隔离栅晶体管)是发展大功率逆变式电阻焊机的首选开关元件,其单管模块额定电流可达1000A以上,集电极耐压高达1200V,可以采用逻辑电平直接驱动,实现了元件驱动的电压控制。

2) 大功率整流二极管的不断更新。由于二次整流元件的接入增加了焊机的功率损耗(约占整台焊机输出功率的28%),虽然采用肖特基二极管会得到改善,但仍存在输出功率受到限制及其冷却系统增加焊机体积和重量的问题。国产快速整流二极管额定电流高达16000A。

3) 主电路拓扑结构的不断发展。应用于逆变式焊接电源的主电路使用过以下拓扑结构,推挽式逆变电路、全桥式逆变电路、半桥式逆变电路、单端式逆变电路等。各逆变电路都有自己的优缺点,要根据实际应用条件而定。

4) 逆变电路控制方式的不断改进。控制方式改进主要体现在逆变电路中功率开关管是以何种模型开断的,即硬开关和软开关。近年来,脉宽调制软开关技术(SPWM)已经成为逆变控制系统的研究热点,它综合了传统的脉宽调制技术和谐振技术的优点,仅在功率器件换流瞬间,应用谐振原理实现零电压或零电流转换,而在其余大部分时间采用恒频脉宽调制方式,完成对电流输出电压或电流的控制,因此,开关器件所受的电流或电压应力小。逆变式电阻焊机特别适宜于机器人焊接和精密焊接。

下面简单介绍 WTC/Medar 集团（美国）的新型 GWS-2D 系列控制器（它配备第五代逆变器、5000 系列时调器、以太网编程器、网关联网通信以及用于保护手工操作连变压器焊钳的安全接地故障安全系统），如图 2-2-99 所示。

1) 第五代逆变器（见图 2-2-100）中，以 2000A 逆变器为例，如果配以匝数比为 1:38 的焊接变压器，则二次焊接电流已可达到 76000A，适合于焊接质量要求高的轻金属。同时，目前已试制出 4000A 的逆变器。



图 2-2-99 GWS-2D 控制器



图 2-2-100 第五代逆变器

2) 5000 系列焊接时调器（见图 2-2-101）中，采用了新型高速微处理器，它不仅能配置成适应各种焊接应用的需要，而且足以处理适应焊接的算法要求，如热膨胀力反馈控制（TFF）和恒热量控制（CHC）。

3) 以太网编程器（数据输入板，EDEP）如图 2-2-102 所示，有两种规格，第一种用于一对一在控制器局域以太网接口上编程和收集数据，第二种用于接在工厂以太网网络上进行操作。焊接控制器上的局域以太网接口和串行接口也可用手提计算机进行操作。

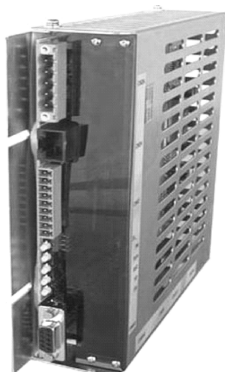


图 2-2-101 5000 系列时调器



图 2-2-102 以太网编程器

4) 安全接地故障安全系统：用连变压器焊枪代替电缆焊枪已成为必然趋势，但这样操作者就直接接近一次 380V 供电电压，若使用 MFDC（中频直流），则电压将会更高。为保护操作者的安全，控制器内安装有接地检测模块（GFM），可检测变压器外壳同控制器安全接地之间的电压是否超过了 24V，可检测变压器一次、二次绕组之间绝缘是否被击穿。同时，该模块还有自诊断能力，

每次接通电源时进行自诊断和每 25h 至少自诊断一次。若发现问题立即停止焊接，并用接地检测模块板上的发光二极管指出问题性质，并将信息传送给控制器，按照问题的严重程度（如接地故障电流处于 10mA 以上，持续多长时间）来判断如何做出反应。接地检测模块共有两个，称为双重重复接地保护安全系统。

5) 恒热量控制：恒热量控制（CHC）是一种适应控制系统，它通过探测焊接状态下电极端之间的电压来控制焊接电流，从而控制每单位体积的总热量。而通常电阻焊控制器所使用的恒电流方法是将焊接电流维持在一个预先设定的数值。在 CHC 中，焊接时被测量和受控制的是所施加的热量。我们知道，电阻焊时发生的热量等于 $I^2 R t$ ，在 CHC 中，该热量将被控制到最佳水平。当发生喷溅时，CHC 测得的 R 值显著下降，此时 CHC 立即作出反应，在测到喷溅的下一周按测到喷溅后的电流率来完成余下的焊接过程，测到喷溅后的电流率是预先设定的，且有几种模式可选择。通过试验考核，用这种方法处理发生喷溅的焊接，不会造成熔核金属的缺少。

近年来，针对二次整流电阻焊机和逆变式电阻焊机均需要对焊接电流进行二次整流，就必然会存在因次数整流元件而带来的一系列问题，国内学者王清在对三相低频电阻焊机深入研究的基础上，开发了无二次整流直流电阻焊新技术，并研制出一台以工业控制计算机（IPC）为控制核心，以 IGBT 为功率开关元件，采用分段斩波控制方法的逆变式无二次整流直流电阻焊机样机，其工作原理如图 2-2-103 所示。试验表明，该机具有良好的点焊工艺性能。

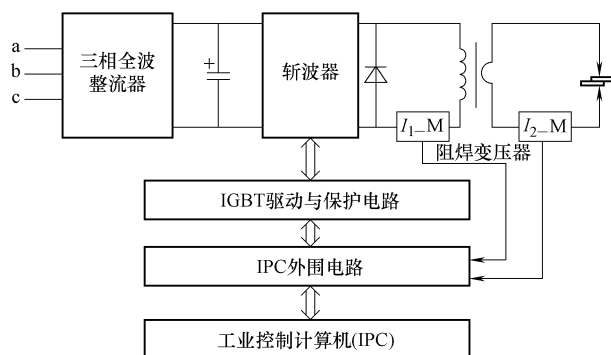


图 2-2-103 逆变式无二次整流直流电阻焊机电路原理图

2.6.4 新型点焊机器人

点焊机器人通常由操作机、控制器和点焊钳等组成，现代点焊机器人的特点如下：

1) 采用逆变一体式点焊钳，大大降低了机器人抓重。具有控制精度高、响应速度快、节能、焊接工艺性能好等显著优点。

2) 采用新型电极驱动机构。近年出现的伺服式点焊钳（枪），用伺服马达作位置反馈，当机器人运行时，机器人控制伺服钳作为其辅助轴之一，可实现电极加压软接触及电极压力实时调节，在与焊接电流最佳配合后，显著提高了点焊质量和消除喷溅。例如 MOTOMAN 点焊机器人已在日本、美国和欧洲获得应用。最新型的伺服焊钳具有气电两种动力来源，既可采用传统的气（液压）缸也可采用交直流伺服电动机作为焊钳驱动装置。其特点如下：

① 压力建立过程迅速、机械负载降低、噪声低、喷溅少、小冲击施压，电极寿命长。

② 伺服电机驱动和气缸驱动任意变换；可实现压力的实时调节，即可在焊接过程中改变压力，实现多种任意可调的稳定压力循环曲线，提高生产效率。

③ 自动补偿电极磨损，电极压力稳定，提高焊接精度和焊点质量。

新型伺服焊钳的优异性能使其成为车身点焊机器人焊钳的首选辅助设备。其最新研究是基于伺

服反馈特性,进行工件不合理匹配、电极磨损故障和焊点压痕的点焊质量在线检测。

图 2-2-104 为 Fronius 公司出产 DELTA SPOT 伺服点焊系统,该系统在电极与工件之间增加了电极带,不但在点焊过程中可以保护工件表面状态,减小焊接飞溅;而且电极与电极带、电极带与工件之间产生的附加电阻可以减小焊接功耗。

3) 自动快速更换多种焊钳技术。机器人带有焊钳储存库,可根据焊装部位的不同要求或焊装产品的变更,自动从储存库抓换所需焊钳(见图 2-2-105)。增加了机器人的柔性。

4) 配备自动化的质量和产量控制系统,如机器人三维激光视觉系统、数字摄像控制系统、射线质量检测系统等,有利于焊接质量的集中管理和控制。

5) 新型的离线示教机器人,可借助 CAD/CAM 获取焊件构造、焊接条件和机器人机构等信息,进行离线示教,示教时间短,焊接质量稳定。

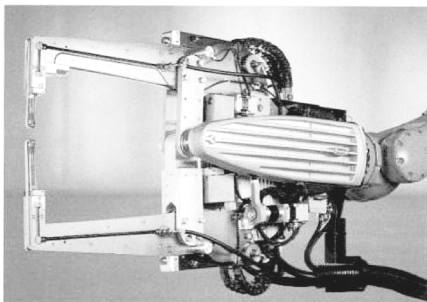


图 2-2-104 DELTA SPOT 伺服点焊钳

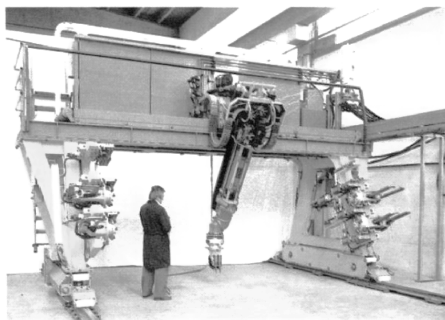


图 2-2-105 可自动更换焊钳的点焊机器人

2.6.5 车身焊装生产线的工艺仿真与规划技术

现代汽车生产的效率越来越高,汽车的改型、变型也越来越快,对车身设计和焊装生产线都提出了更多、更高的要求。车身焊装生产线的工艺仿真与规划技术是确保车身焊接生产线实现高效率、高柔性、高品质的重要前提。

车身焊装生产线的工艺仿真规划技术的特点和主要功能包括以下方面:

① 结合 CAD、CAE、VR 和离散事件仿真技术,提供车身制造工艺“概念规划—粗规划—详细规划—生产运行管理”的完整解决方案,支持生产区域的工艺规划和模拟,如焊点布置、生产线的模拟、机器人模拟等。

② 提供工艺规划的支持,获得产品数据和三维装配信息,定义工序顺序,优化布置焊点,用二维和三维的方式进行资源配置和布局,对变更进行管理,进行投资成本评估,并可生成工艺卡和相关文件资料。

③ 对工艺仿真的支持。对车身焊装信息(如工位、夹具、车身零部件、焊点、焊枪和操作者等)进行建模,生成用于模拟的工作单元,管理并分析模拟结果,通过工作单元的组合来进行生产线模拟。

2.6.6 电阻焊质量控制技术

保证电阻焊接头质量,提高其可靠性的核心就是在生产过程中运用先进的手段和设备实施质量控制。特别是由于点焊工艺运用的广泛性、重要性和具有代表性,点焊质量控制技术始终是电阻焊领域研究的前沿和热点。

众所周知,点焊过程是一个高度非线性、有多变量耦合作用和大量随机不确定因素的过程,具有形核过程时间极短,处于封闭状态无法观测,特征信号提取困难等特点。这就造成焊点质量参数

(熔核直径、强度等)无法直接测量,只能通过一些点焊过程参数(焊接电流、电极间电压、动态电阻、能量、热膨胀电极位移、声发射、红外辐射和超声波等)进行间接的推断,这就极大影响了点焊质量监控的准确性和可靠性。经过较长时间的探索和实践,研究者已获得如下共识:发展多参量综合监测技术是提高点焊质量监控精度的有效途径,即充分利用监测信息,采用合理的建模手段,建立合理的多元非线性监测模型并使该模型能在较宽条件内提供准确、可靠的点焊质量信息,是质量控制技术关键。研究表明,利用神经网络理论、模糊逻辑理论、数值模拟技术及专家系统等可望解决真正的点焊质量直接控制,将点焊质量控制技术的研究推向一个新高度。

1. 基于模糊分类理论的点焊质量等级评判

德国学者 Burmeister 认为,电阻点焊过程是一个分类过程,是不能用公式来清晰描述的。只有通过监测点焊过程参数的一些最大值或最小值来进行片面描述,这样就可以从过程的函数描述转换为过程的分类描述,并用现有的专家知识来建立分类等级。目前,已有用模糊分类的方法来评估焊接电流引起的过程信号(电极位移特征量、电极加速度特征量)和焊点质量变化的报道。并指出模糊分类虽然适用于描述点焊过程的复杂性和非线性,可以用于焊点质量的等级评估,但只能给出焊点质量参数的大致范围,而且评价的准确性难以避免地受到专家知识等众多人为因素的影响。

2. 基于回归分析理论的点焊质量多参数监测方法

铝合金点焊焊接性较差,应用又日益广泛,迫切需要解决其质量的监控问题。英国学者 M. HAO 等人研制了一种铝合金点焊多参数监控系统,该系统可采集点焊过程参数和识别较宽范围过程现象的特征量,并利用回归分析的方法估测焊点的熔核直径和抗拉强度,试验表明,回归模型的估测值有足够的准确性。

3. 基于多参量综合的点焊质量智能监控

(1) 基于神经网络理论的点焊质量多参量综合监测 国内学者张忠典等人运用神经网络理论,研究了低碳钢动态电阻与焊点质量之间的模型关系,建立了点焊质量模糊综合评判模型,实现了低碳钢点焊质量的多参量综合监测。实验表明,即使在恶劣的生产条件下,该系统也能实时、准确地监测点焊质量,确定合理的质量等级,满足实时监测及焊后评估的要求。

(2) 基于数值计算的熔核直径在线自适应控制 日本学者西口公之等人研发的该方法需在焊前预先输入被焊件所用材料种类及其材质的力学与热物理参数、板厚、电极形状、焊接时间等,并在焊接过程中,每隔一定时间间隔检测焊接电流与电极间电压,按照热传导数学模型计算出温度场分布情况,从而实时推算出熔核的生长情况,并据此反馈控制焊接电流以改变焊接区温度上升斜率。此方法通过合理调控各时间段温度上升斜率,确保熔核在指定时刻开始生成、长大过程及结束前达到要求的直径。实际生产使用证明,本技术能较好地解决电极磨损及镀锌钢板点焊时,由于接触面积增大使电流密度减小而引起产生小焊点的严重质量问题。缺点是该方法需进行大量在线计算,必须采用高性能计算机,使设备投资增加。

目前,用数值模拟方法模拟铝合金点焊过程热—电—力学过程,预测点焊熔核的生长、电极磨损和裂纹形成情况等的研究正在进行,并取得一定进展。

(3) 智能点焊质量调节技术(IQR) IQR(Intelligent Quality Regulation)这是一种联机(与中频系统)自适应调节器,调节原理是:实时监测焊接电流和电压,并计算出电阻和功率,利用动态电阻与点焊熔核生成之间的关系,跟踪电阻曲线,通过调节焊接电流、时间,强制该焊点在形成过程中的动态电阻按照合格焊点的动态

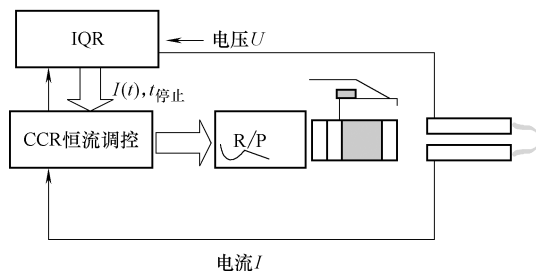


图 2-2-106 IQR 点焊智能质量调控系统控制原理图

电阻曲线发展,从而保证每个焊点的质量。IQR 点焊智能质量调控系统的控制原理如图 2-2-106 所示。

IQR 点焊智能质量调控系统的特点如下:

1) 适用于钢板、镀锌钢板和高强度钢板,调节考虑焊接材料的物理条件。
2) 实时在线调节当前焊接参数,自适应排除干扰因素的影响,比恒流控制器焊接范围广泛和焊接过程稳定。

3) 直接从焊接变压器上测量焊接过程中的电压、电流,不需要从电极上连接信号线。

4) 内部实时计算电阻及功率。

(4) 基于 SPC 统计过程控制的点焊质量监控 电阻点焊 SPC (Statistical Process Control, 简称 SPC) 统计过程控制,主要通过实时测量焊接电流、电极压力、电极位移等点焊变量,将其作为控制量进行 SPC 统计计算,得到带有控制上限和下限的控制图(见图 2-2-107)和直方图,根据控制图或直方图就可确定每个变量的超差情况,最后确定工件的焊后状态:废品或合格产品。

SPC 统计质量控制用于汽车座椅调角器电容储能电阻焊,是实现电阻焊全过程多参数统计质量控制的一个实例,统计结果如图 2-2-108 所示,图 2-2-108a 表示,检测数值在规范内,符合焊接要求,直方图为绿色。检测数值在规范外时,该参数的直方图则将显示成红色,该图中最后两个参数压力和压陷超出了规范值,故其颜色为红色。

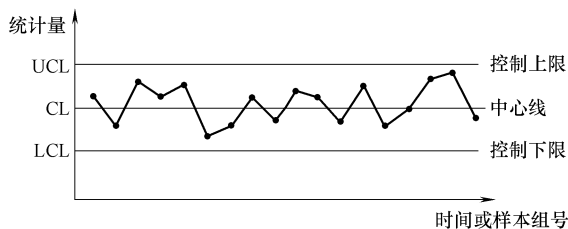
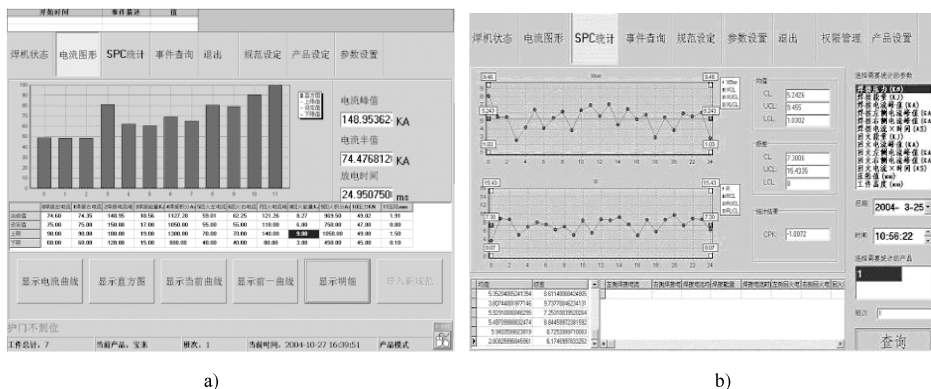


图 2-2-107 典型控制图



a)

b)

图 2-2-108 统计结果显示

a) 直方图 b) SPC 控制图显示

图 2-2-108b 表示,处于上方的图表为均值数据,下方是极差数据,数据以 125 个数据,5 个一组作为统计标准。共产生 25 个数据点。左下的列表为 25 个点的具体数据,点击这些具体数据可以在正下方的列表看到计算均值和极差前的 1 组 5 个基础数据。中间一栏是对这 125 个数据统计分析后得出的控制量均值和方差的 CL、UCL 和 LCL 值,以及相应的 Cpk 值。

上述实例说明:SPC 统计质量控制方法能成功地应用于电阻焊在线质量控制上,并在实际生产中取得了较好的效果。同时,系统实现了焊接参数的上下限设置,焊接过程中参数及曲线的实时检测显示、故障报警及焊接质量的统计过程分析等功能,从真正意义上实现了电阻焊质量的全过程控制,对保证产品质量具有很强的实际意义。

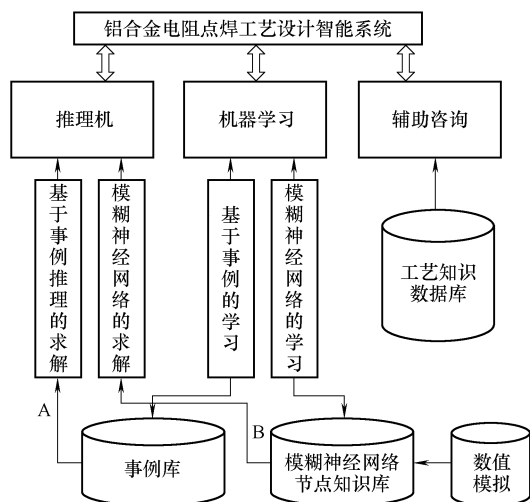
(5) 其他相关点焊质量智能监控 2005 年,赵熹华、曹海鹏等在国家自然科学基金

(50175048) 资助下利用多种人工智能技术开发铝合金点焊质量智能控制系统,把模糊控制 (FLC) 和人工神经网络 (ANN) 建模相结合,取得一定进展。其中,研制成功“铝合金点焊工艺设计及质量预测智能混合系统”软件包,其主要组成如图 2-2-109 所示。

系统由三个主要模块组成:推理机模块、机器学习模块以及辅助咨询模块。推理求解分为两条路径:基于事例推理的求解和模糊神经网络求解。

在基于事例推理求解模块中,集合了基于规则的推理 (RBR)、基于事例的推理 (CBR) 以及模糊技术。基于事例的推理机制的一个重要的研究方面是对于相似以前事例中所含有的工艺知识、规则进行提取、总结,从而指导对新问题的求解。而模糊推理不必建立明确的数学模型,比较适合直接应用专家的经验,因此本系统采用模糊推理的技术对相似的点焊工艺事例进行规则提取,从而指导对新工艺参数的求解。在基于事例推理的求解中,建立了铝合金电阻点焊工艺事例特征属性的划分。铝合金点焊工艺设计是一个多层次、多任务、多目标的复杂设计问题,涉及的因素面广,如母材规格、供电波形、焊机类型等。因此,点焊工艺事例特征提取也较为复杂。本系统依据点焊工艺的特殊的工艺过程,将点焊工艺特征分为两大类,事例特征 I 和事例特征 II。

基于模糊神经网络的求解流程如图 2-2-110 所示。



A: CBR+RBR+模糊推理技术 B: FNN 求解技术

图 2-2-109 铝合金点焊工艺智能规划系统模型

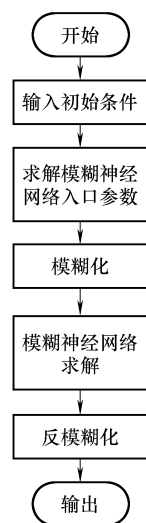


图 2-2-110 模糊神经网络求解流程

系统由用户的输入条件求解相应的模糊神经网络入口参数:即材质的热物理参数、板厚、点焊规范强度表征。对上述参数进行模糊化处理后,进入模糊神经网络进行映射求解。而后对求解的出的模糊输出进行相应的反模糊化处理,进而得到相应的铝合金电阻点焊焊接参数。采用模糊神经网络这种集成人工神经网络技术和模糊技术的推理求解方式可以充分利用二者的优点,更加适合铝合金电阻点焊焊接参数的智能规划。其中一个核心网络模型如图 2-2-111 所示。

本系统采用 VC6.0 和 Matlab5.3 结合开发完成,其中一个模糊神经网络学习界面如图 2-2-112 所示。

铝合金电阻点焊智能规划系统能够根据焊接材质的物理性质较为合理地求解其相应的电阻点焊焊接参数。

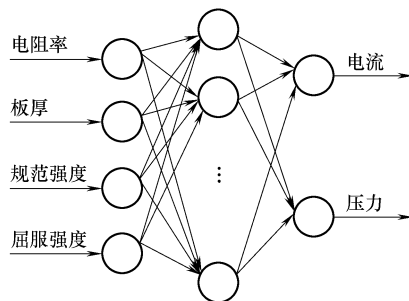


图 2-2-111 模糊神经网络模型

研制成功“铝合金点焊智能恒流控制器”，其主要组成如图 2-2-113 所示。

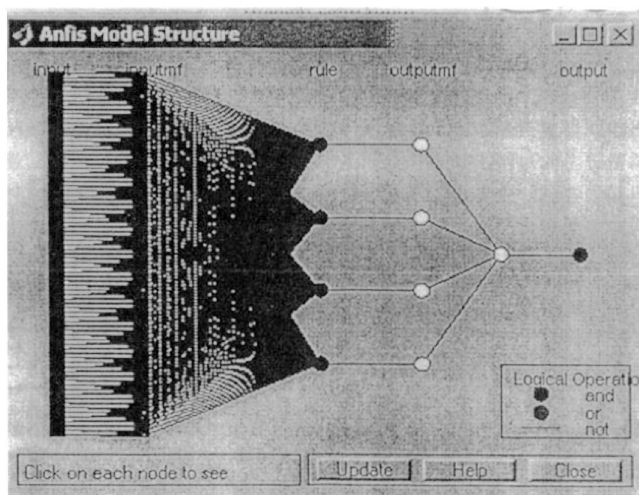


图 2-2-112 模糊神经网络训练界面

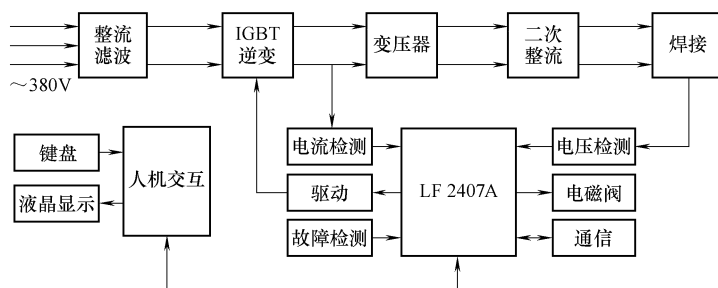


图 2-2-113 控制器模块图

电阻点焊智能控制系统由铝合金电阻点焊电流及电压参数检测模块、IGBT 驱动及电磁阀驱动模块、故障检测模块、人机交互模块（键盘输入和液晶显示电路）、DSP 主控模块以及通信模块六部分组成。其中，焊接参数检测模块完成点焊机一次电流、二次电压参数的检测，为系统智能控制提供控制及检测参数；IGBT 驱动模块执行控制 IGBT 的驱动，控制主电路电流的占空比从而控制其有效值；电磁气阀驱动模块执行电磁气阀控制，实现焊接过程中压力的施加与去除；故障检测模块完成主要元件的保护及故障报警；参数输入和显示电路承担人机对话功能，完成各种控制参数的输入和焊接电流平均有效值、加热数据显示；通信模块执行系统存储数据同其他计算机系统之间的数据通信；DSP 模块选用了功能强大的 TMS320LF2407A 为主控制芯片，采用快速存储器等相应的同主 CPU 相适应的周边设备。系统主体模块如图 2-2-113 所示，主控板照片如图 2-2-114 所示。

应用控制软件完成焊接参数设置、焊接质量实时智能控制、同其他计算机数据通信等功能以及故障检测等功能。系统功能模块之间转换通过人机交互子系统进行控制，以中断的方式进行。软件总控流程如图 2-2-115 所示。

系统通过对多次正常情况下焊接过程中电压参数的采集，将采集数据经由通信模块传输到主计算机中，对电压参数进行分析，得到相应正常的焊接过程电压数据，作为过程电压参照。在其后的焊接过程中，在每个半周波内进行电极间电压测量值同标准值的比对，根据其偏差对焊接设定电流 I_g 进行调整从而产生 I'_g 作为焊接电流智能控制的参照。通过对电极间电压参数的监测可以弥补焊接区由于分流产生的热量产生不足。系统总体控制框图如图 2-2-116 所示。

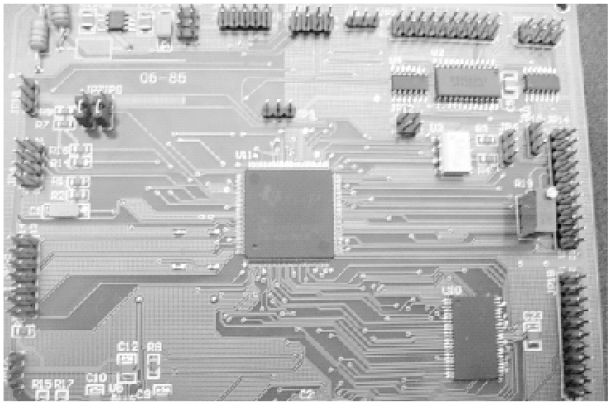


图 2-2-114 DSP 主控板照片

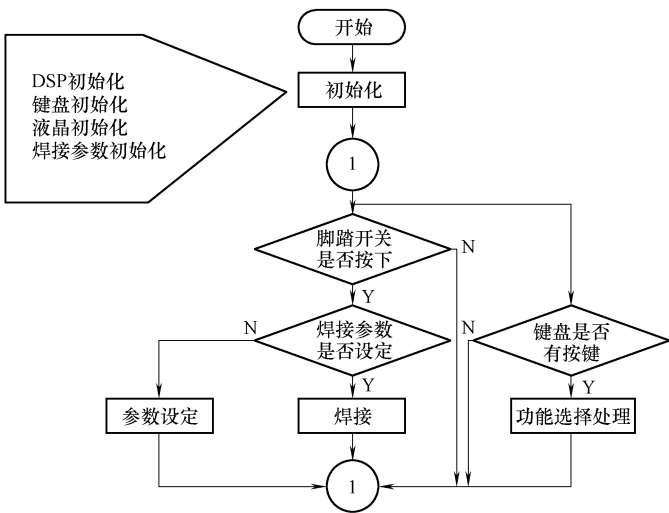


图 2-2-115 软件总控流程

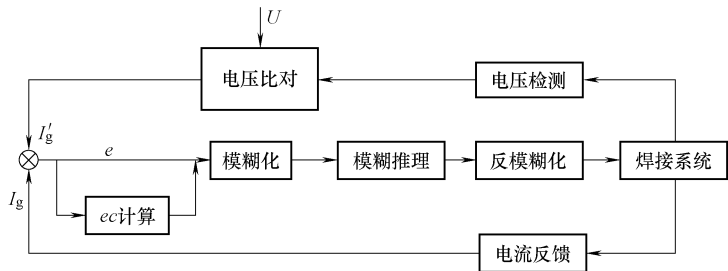


图 2-2-116 铝合金电阻点焊过程智能控制框图

模糊控制可以利用领域专家的操作经验、知识和推理技术及控制系统的信息得出相应的控制动作，在不确定性和非线性的控制中具有很好的鲁棒性。在电流控制子系统中，采用模糊控制中的查表法。选择焊接电流的偏差 e 和偏差变化率 ec 作为恒流模糊控制器的输入量，脉冲宽度变化量 u 作为输出量，从而实现铝合金电阻点焊电流的智能控制。其中 I'_g 为经过调整后的电流给定值， I_g 为电流反馈值。本系统的设计目标是在网压波动 $\pm 15\%$ 范围内，焊接电流偏差在 $\pm 2\%$ 。在模糊控制中，随着系统模糊划分细密程度的提高，系统的精度也随着相应的提高，但是系统存储容量及运算

时间难以达到过高的模糊划分的要求。本系统电流偏差模糊划分如图 2-2-117 所示。图 2-2-118 为系统在偏差为正弦波动在 $\pm 15\%$ 范围内的输出相应曲线,可以看出本系统输出较为稳定,偏差很小。

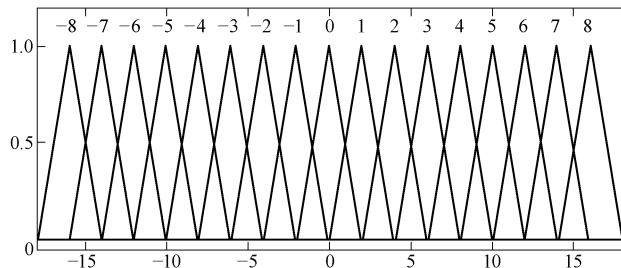


图 2-2-117 电流偏差模糊划分

2007 年,罗震等人提出基于数值模拟的点焊接头力学性能的逆过程设计方法,建立了点焊焊接结构的力学性能与熔核尺寸的模型,通过有限元软件进行模拟计算,找到熔核形核所需的电流曲线。

2008 年,王蕤采用一套以磁场信号为检测对象,采用磁敏传感器阵列技术采集特征信息的点焊质量检测系统。传感阵列由 6 个传感单元组成,每个传感单元均是以磁敏电阻碲化铟(InSb)作为探头以及其外围电路组成。磁敏传感单元以其排列方式的不同,分别组成以

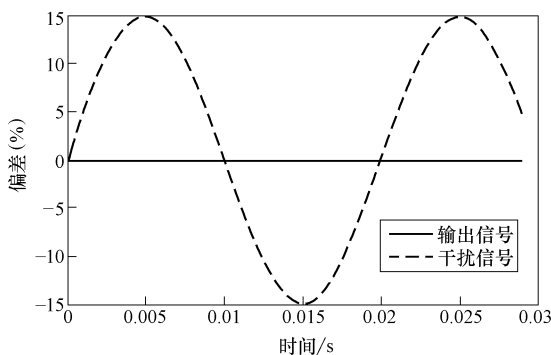


图 2-2-118 模糊系统响应图

直线形排列的“—”形磁敏传感阵列;以环形排列的“O”形磁敏传感阵列;以交叉方式排列的“十”形磁敏传感阵列。分别采用这 3 种阵列对铝合金点焊过程的磁场信号进行检测。以主分量分析(PCA)算法为基础,编制有关传感器阵列数据处理软件提取有关点焊质量特征值,得出焊接磁信号阵列的特征信号与焊点质量之间的关系,以此判断点焊熔核质量。

2008 年,罗保发利用数值仿真出的相变场进行组织分析和预测,探讨铝合金点焊过程中的母材组织、热影响区组织和熔核组织的变化进程。对不同点焊工艺条件下铝合金点焊性能进行分析,主要研究出回火工艺对铝合金点焊性能的影响,实现对铝合金点焊接头质量的控制。

2008 年,刘鹏飞以铝合金点焊质量的逆过程检测方法为研究对象,对点焊过程中的特征信息提取、分析技术进行了研究。采用虚拟仪器语言构建了面向多信息融合的智能信息采集系统,采集了电极电压、焊接电流、焊接过程中的声发射和电极位移四个参量数据;应用信号分析理论和非线性动力学理论提取信号的特征值;应用人工智能理论,模式识别理论及应用数学方面的知识,把模糊灰色信息系统、支持向量机和隐形 Markov 链引入点焊的质量检测中,并讨论了各模型的检测效果及本文提取的各数据特征对模型检出准确率的影响情况;构建了熔核尺寸检测和飞溅检测模型阵列。

参考文献

- [1] 赵嘉华. 压力焊 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 赵嘉华. 焊接方法与机电一体化 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [3] 赵嘉华, 冯吉才. 压焊方法及设备 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

-
- [4] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册: 第1卷 焊接方法及设备 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [5] 中国机械工程学会, 中国材料研究学会. 中国材料工程大典: 第22卷 材料焊接工程(上) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [6] 王敏. 材料成形设备及自动化 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [7] 中国机械工程学会焊接分会. 焊接词典 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [8] 中国机械工业标准汇编: 焊接与切割卷(上) [M]. 2版. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [9] 成都电焊机研究所. 焊接设备选用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [10] 北京·埃森焊接与切割展览会. 展会综合技术报告 [R]. 北京: 第十五届北京·埃森焊接与切割展览会组委会, 2010.
- [11] 曹海鹏. 铝合金点焊工艺设计及质量控制的智能化研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [12] 李永强. “激光束-电阻缝焊”复合焊接方法基础研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.

第3章 扩散连接

扩散连接（也称扩散焊，Diffusion Bonding，Diffusion Welding）是指相互接触的材料表面，在温度和压力的作用下相互靠近，局部发生塑性变形，原子间产生相互扩散，在界面处形成新的扩散层，从而实现可靠连接。

扩散连接特别适合异种金属材料、陶瓷、金属间化合物、非晶态及单晶合金等新材料的连接，广泛应用于航空、航天、仪表及电子等国防部门，并逐步扩展到机械、化工及汽车制造等领域。

3.1 扩散连接机理

扩散连接可以分为直接扩散连接和添加中间层的扩散连接，按照是否产生液相又可分为固相扩散连接和液相扩散连接，根据连接环境还可分为真空扩散连接和保护气氛环境下的扩散连接，如图 2-3-1 所示。

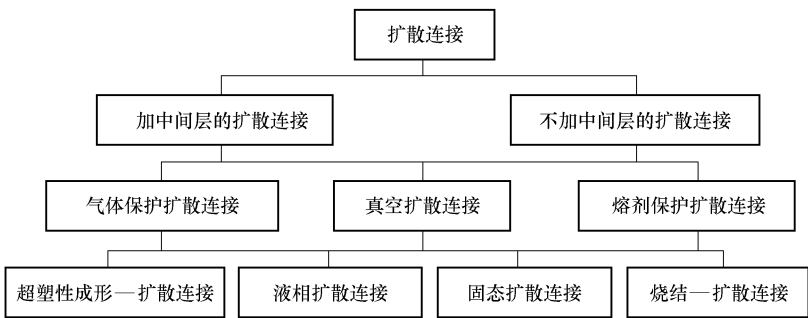


图 2-3-1 扩散连接分类简图

3.1.1 固相扩散连接的基本原理

1. 接头形成过程

扩散连接过程可以大致分为物理接触、接触表面的激活、扩散及形成接头三个过程（也称三个阶段）。第一阶段为物理接触阶段，高温下微观不平的表面，在外加压力的作用下，局部接触点首先达到塑性变形，在持续压力的作用下，接触面积逐渐扩大，最终使整个接合面达到可靠接触。第二阶段是相互扩散和反应阶段，在温度和压力的作用下，紧密接触的界面上发生元素扩散、晶界迁移和化学反应，使微孔消除和形成新的反应相，并在界面形成牢固的接合层。第三阶段是接合层的成长阶段，该阶段主要是接合层逐渐向体积方向发展，气孔消除并形成可靠的连接接头。图 2-3-2 是扩散连接的三阶段模型示意图。

上述过程相互交叉进行，最终在连接界面处由于扩散、再结晶等生成固溶体及共晶体，有时生成金属间化合物，形成可靠的连接接头。该过程不但应考虑扩散过程，同时应考虑界面生成物的性质，如性能差别较大的两种金属，在高温长时间扩散时，界面极易生成脆性金属间化合物，而使接头性能变差。

2. 材料连接时的物理接触过程

材料的扩散连接表面应达到一定的表面粗糙度，以实现表面良好接触及克服表面氧化膜对扩散

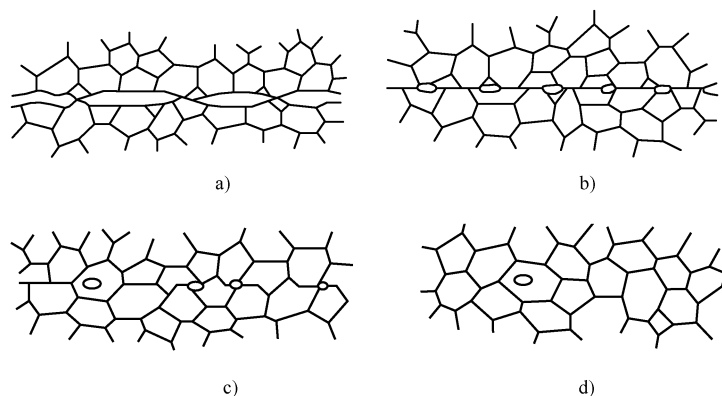


图 2-3-2 扩散连接的三阶段模型

- a) 凹凸不平表面的初始接触 b) 变形和形成部分界面阶段
c) 元素相互扩散和反应阶段 d) 体积扩散及微孔消除阶段

连接的影响。在扩散连接的第一阶段，必须从被连接界面上清除吸附层和氧化膜，才能形成实际的接触。

(1) 物理接触及氧化膜去除 被连接面在真空中加热时，油脂逐渐分解和挥发，吸附的蒸气和各种气体分子被解吸下来，但化学吸附气体和氧化膜难以从表面上清除。在扩散连接条件下，由于产生解吸、升华、溶解和还原作用，很容易将氧化膜清除。

1) 解吸：连接加热条件下，Ag、Cu、Ni 等金属的氧化物可以解吸下来，加热使金属表面的氧化物结构发生变化，提高真空度可使氧化物解吸的温度下降。

2) 蒸发及升华：当氧化物的饱和蒸气压高于该氧化物在气相中的蒸气分压时，在真空中的氧化膜可升华。当被连接材料加热到接近金属熔点的高温时，能发生强烈的蒸发。两种材料相互接触时，升华及蒸发的可能性大大下降。

3) 溶解：由于界面间的相互作用，金属表面的氧化膜向基体中溶解，或利用母材中所含的合金元素发生还原反应。氧化膜在基体金属中的溶解速度取决于温度和氧在该金属中的溶解度与扩散速度，例如在扩散连接钛及其合金时，氧在钛中的扩散速度和溶解度都特别大，比铁、铝等金属要大 1~2 个数量级，可以利用这一优点来消除钛表面的氧化膜。

4) 化学反应：真空系统中残留的 H_2O 、 CO_2 、 H_2 、 O_2 等化学活性气体，会与连接材料的表面发生氧化-还原反应。可用化学反应的平衡常数作为活性因素来确定真空介质成分对化学反应的影响。

5) 表面变形去膜：在被连接界面已经接触的条件下，如果金属与其氧化物的塑性、硬度、热膨胀系数相差很大，即使极其微小的变形也会破坏氧化膜的整体性而龟裂成碎片被除去。

(2) 氧化膜去除机制 在一般真空度条件下，氧化膜去除有以下 3 种机制（见图 2-3-3）。

1) 钛镍型：这类材料扩散连接时，氧化膜的去除主要是靠在母材中产生溶解，钛或镍金属表面附有非常薄的氧化膜（一般只有 $0.003 \sim 0.008 \mu m$ ），在高温下，这样薄的氧化膜可以很快在母材中溶解，不会对扩散连接接头造成影响。

2) 钢铁型：经过清理后钢铁材料表面有少量氧化膜，由于氧在基体中溶解量较少，在扩散连接过程中形成氧化膜的集聚，在空隙内或接合面上形成夹杂物。夹杂物主要是 Al、Si、Mn 等元素的氧化物和硫化物。

3) 铝合金型：由于表面有一层致密的氧化膜，而且这种氧化膜在基体中的溶解度很小。去除氧化膜的方法主要是在扩散连接过程中，通过微观区域的塑性变形使氧化膜破碎，或在扩散连接

时，真空室中含有很强的还原元素（如镁等），将铝表面的氧化膜还原。

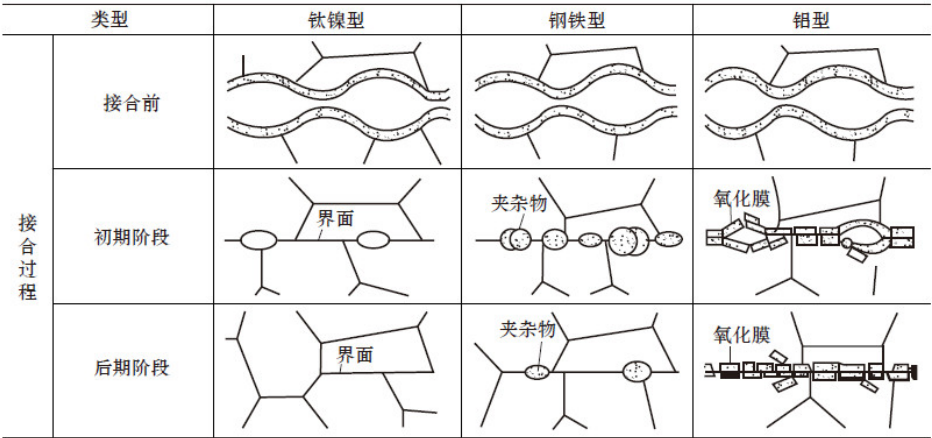


图 2-3-3 氧化膜去除机制示意图

（3）物理接触的形成 扩散连接时表面的物理接触（使表面接近到原子间力的作用范围之内，也称实际接触）是形成连接接头的必要条件。表面凹凸变形的接触面积，一般称为物理接触面积，它主要取决于材料的性质、连接温度和施加的压力。

扩散连接物理接触是依靠一种（或两种）被连接金属在接触处的塑性变形来实现的，可以分为变形、流动和使实际接触面积增加几个阶段。加压初期，只在个别点上产生接触，这时接触面积还不到总面积的 1% ~ 2%。在相互接触点上的作用应力大大超过屈服点，并引起这些点的弹—塑性变形。其变形速度的变化如图 2-3-4 所示。

经过几秒钟的加压以后，变形量相应地降低 2 ~ 3 个数量级，并转入不稳定的流动阶段。这时接触区内的塑性变形取决于温度和压力，实际接触面积可以达到名义接触面积的 40% ~ 75%。实际接触面积的继续增长与材料稳定的流动过程有关，在外力场的作用下，应力、温度、结晶组织中的缺陷密度、杂质和合金元素对材料的流动速度有很大影响。形成实际接触的时间与温度和压力有关，约为 1min 到几十分钟，这时可能使实际接触面积达到总面积的 90% ~ 95%。剩余 5% ~ 10% 的孔隙将在扩散过程中被填满。图 2-3-5 给出了钛扩散连接时的物理接触面积与温度、时间之间的关系。值得注意的是，使实际接触面积增大的压力 P 虽然不随时间变化，但因接触面逐渐变大，相对压力下降，蠕变速度变慢，从而使物理接触过程变慢。

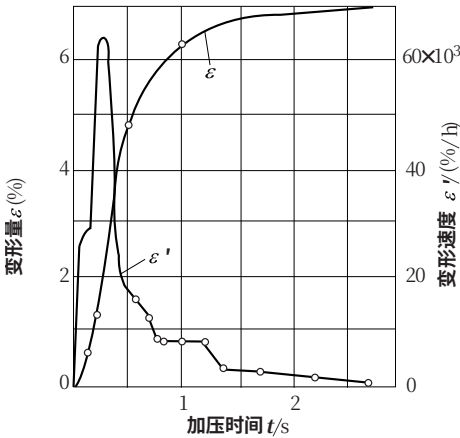


图 2-3-4 加压时间与表层变形量、变形速度之间的关系

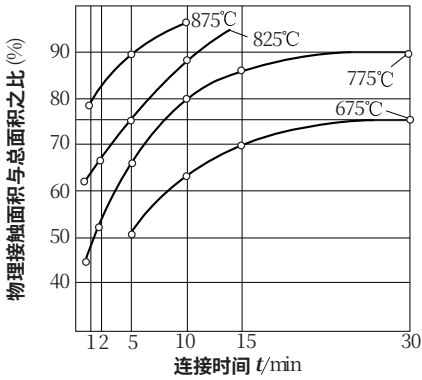


图 2-3-5 钛接头中物理接触面积与温度及时间的关系

3. 扩散连接时的化学反应

(1) 原子的相互作用 接触面形成时, 所产生的结合力不足以产生表面原子间的牢固连接, 为了获得原子之间的牢固结合 (形成金属键、共价键、离子键), 就必须激活表面上的原子。金属在外力作用下产生的切应力和正应力引起金属表面吸附层的塑性变形和流动, 塑性变形会使结晶组织中的缺陷 (位错和空穴) 发生振荡、迁移和离开表面, 温度越高, 位错和空穴迁移的密度和速度增加的越大。

在扩散连接的前期, 物理吸附和化学吸附比较重要。被连接材料在外界压力作用下, 连接界面的元素应首先靠近并达到一定距离, 才会形成范德华力作用的物理吸附。一般来讲, 物理吸附时离子间距 $R_1 \approx 2 \sim 4\text{nm}$, 能量 $E_1 \approx 0.04 \sim 0.4\text{kJ/mol}$ 。而化学吸附时 $R_2 \approx 0.1 \sim 0.3\text{nm}$, $E_2 \approx 2 \sim 3 \times 10^2\text{kJ/mol}$ 。试验研究表明, 是否能在异种金属间形成原子键, 首先取决于异种金属中较硬金属表面的激活程度, 也取决于所施加压力的大小。其次, 也应考虑材料间相互作用的物理化学特性、晶格类型、原子和离子半径的差别、互溶性、弹性模数比值等。虽然这些因素不会妨碍建立原子键, 但对连接过程的发展变化有影响, 会使表层的原子产生应力。扩散连接的后期, 被连接金属表面已被激活的原子间产生各种相互作用。

(2) 扩散时的化学反应 在异种材料特别是金属与非金属材料连接时, 界面将发生化学反应。首先在局部形成反应源, 而后向整个连接界面上扩展, 当整个界面都发生反应时, 则形成良好的连接。产生局部化学反应的萌生反应源与连接过程的连接参数 (温度、压力和时间) 有密切关系。扩散连接压力对反应源的数量起决定性的影响, 压力越大, 反应源的数量越多; 连接温度和时间主要影响反应源的扩散程度, 它们对反应源数量的增长影响不大。

1) 反应类型: 界面进行的化学反应主要有 $\text{AO} + \text{BO} = \text{ABO}_2$ 的化合反应和 $\text{AO} + \text{B} = \text{BO} + \text{A}$ 的置换反应。化合反应开始由局部发生, 而后逐渐扩展到整个表面, 并形成一定的化合物层, 有时在界面上可能形成一个很宽的难熔的化合物层。当一种反应层在反应界面之间形成时, 反应过程将受到产物层中各元素扩散速度的影响。而实际的相互作用, 显然要比化学计量方程所描述的复杂, 因为在连接界面区多组元分子接触可以形成固溶体、氧化物和某一反应剂的还原物。

置换反应与化合反应不同, 当活性金属铝、镁、铍、钛、锆、铬等及其合金与玻璃或陶瓷材料连接时, 则按一定的反应速度形成置换反应, 当在界面上形成大面积反应区时, 反应速度并不减缓。因反应物可以逐渐溶解在被结合的金属中, 反应产物逐渐聚集。如果金属零件的尺寸有限, 则被溶解的物质可能达到饱和浓度而析出和分解后形成新相。如图 2-3-6 所示, 铝与氧化硅在界面上相互作用时, 发生置换反应, 二氧化硅中的硅被铝置换, 还原为硅原子溶解于铝中。当达到饱和浓度后, 则由固溶体中析出 Si 的新相。但过度的反应可能降低接头的性能, 这是扩散连接所不允许的。如以铝做中间层连接石英玻璃, 铝置换石英 (二氧化硅) 中的硅, 生成 Al_2O_3 和 Si, 生成的硅在铝中溶解和聚集。当中间层的厚度很小时, 则硅在铝中的溶解达到饱和浓度而析出, 最终在界面上会析出硅和氧化铝两个新相。由于硅和氧化铝的塑性较低, 界面新相与母材的线膨胀系数不匹配, 造成接头内存在热应力, 而使接头的力学性能显著下降。

2) 反应的热力学计算: 在扩散连接条件下, 局

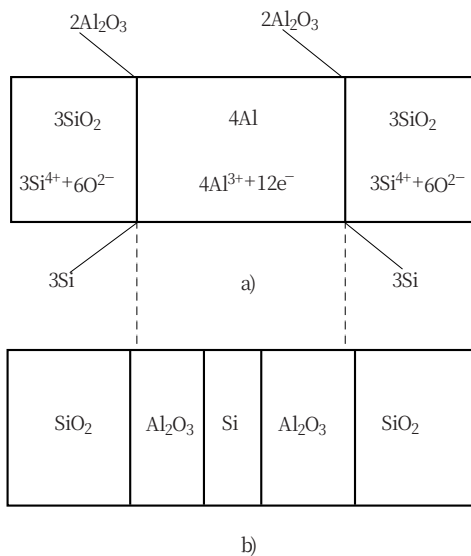


图 2-3-6 SiO_2 中硅与铝的置换反应

a) 反应产物溶解 b) 形成新相

部化学反应的进行可以用热力学来分析。以陶瓷与金属的扩散连接为例,在扩散过程中,各相之间的化学反应在热力势为负值时能够进行,可以用吉布斯-泽尔曼方程式进行计算:

$$\Delta G_{298}^0 = \Delta H_{298}^0 - T\Delta S_{298}^0 \quad (2-3-1)$$

式中, ΔH_{298}^0 和 ΔS_{298}^0 分别是反应的原始产物和最终产物的标准生成热和标准熵的变化,在已知材料热容量变化 ΔC_p 的条件下,可按式 (2-3-2) 和式 (2-3-3) 计算,而高温下的吉布斯-泽尔曼热力势可用式 (2-3-4) 求解。

$$H_T^0 = H_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT \quad (2-3-2)$$

$$S_T^0 = S_{298}^0 + \int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT \quad (2-3-3)$$

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T\Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT - \int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT \quad (2-3-4)$$

利用上述公式计算的常用陶瓷和金属反应的吉布斯能量变化如下:

$\text{NiO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{NiAl}_2\text{O}_4$, $\Delta G_{1200\text{K}} = -21.74 \text{ kJ/mol}$;

$\text{CoO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CoAl}_2\text{O}_4$, $\Delta G_{1200\text{K}} = -20.48 \text{ kJ/mol}$;

$\text{Cu}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Cu}_2\text{Al}_2\text{O}_4$, $\Delta G_{1200\text{K}} = -16.72 \text{ kJ/mol}$;

$\text{Si}_3\text{N}_4 + 4\text{Ti} \rightarrow 4\text{TiN} + 3\text{Si}$, $\Delta G_{1200\text{K}} = -552 \text{ kJ/mol}$;

$5\text{Ti} + 3\text{Si} \rightarrow \text{Ti}_5\text{Si}_3$, $\Delta G_{1173\text{K}} = -205 \text{ kJ/mol}$;

$\text{Si}_3\text{N}_4 + 4\text{Al} \rightarrow 3\text{Si} + 4\text{AlN}$, $\Delta G_{1473\text{K}} = -382.8 \text{ kJ/mol}$;

$\text{Si}_3\text{N}_4 + 4\text{Hf} \rightarrow 3\text{Si} + 4\text{HfN}$, $\Delta G_{1473\text{K}} = -632 \text{ kJ/mol}$;

$\text{Si}_3\text{N}_4 + 4\text{B} \rightarrow 3\text{Si} + 4\text{BN}$, $\Delta G_{1473\text{K}} = -234 \text{ kJ/mol}$ 。

3) 反应产物:无论是化合反应还是置换反应,界面大多生成无限固溶体、有限固溶体和反应层。对于异种金属来说,反应层一般为金属间化合物,而对于陶瓷和金属来讲,反应产物比较复杂,可生成各类化合物。

a) 无限固溶体:扩散连接具有无限互溶性的金属(如钢与镍)时,在界面上会产生成分不定的固溶区,固溶区的宽度与连接温度和时间有关。均质的固溶体塑性很高,强度也高于基体金属。

b) 有限固溶体:具有有限互溶的金属(通常随着温度的上升,溶解度也相应变大,如铜与铁)扩散连接时,界面将产生浓度不同的固溶体区域。该区域的厚度由连接规范参数(温度、时间及压力)决定,当接头中形成较厚的共晶体脆性层时,接头的塑性和强度下降。

c) 金属间化合物:某些异种金属在扩散连接时(如钢与铝、钛与铝、铜与钛、锆与铁、锆与镍等),过渡区中的元素很容易达到极限溶解度,此时界面将生成金属间化合物。金属间化合物形成的初期,由于元素沿着晶粒边缘的扩散系数要比体扩散系数大得多(有时甚至大几个数量级),沿晶界扩散元素的浓度比平均浓度高,固溶体先在晶界的局部地区产生过饱和,从而产生新相(金属间化合物)的“核”。随着扩散的进行,新相的核不断扩大,变成间断的块状金属间化合物,当进一步扩大连成一体时,形成连续的新相层。金属间化合物很脆,使接头性能大为降低,因此,必须对金属间化合物的种类、存在形态及厚度进行控制。

d) 陶瓷与金属界面的脆性化合物:陶瓷和金属扩散连接时,由于两种材料的物理性质和化学性质差别非常大,界面容易产生化学反应,形成由二元化合物(碳化物、硅化物、氮化物、硼化物等)、三元化合物和多元化合物组成的脆性层。其反应过程详见本章陶瓷与金属的扩散连接部分。

3.1.2 液相扩散连接的基本原理

液相扩散连接方法是在扩散钎焊和加中间层扩散连接的基础上发展起来的一种新方法,在弥散

强化高温合金、纤维增强复合材料、异种金属材料以及新型材料的连接中得到了大量应用。该方法也称瞬时液相扩散连接 (Transient Liquid Phase, TLP), 通常采用比母材熔点低的材料作中间夹层, 在加热到连接温度时, 中间层熔化, 在结合面上形成瞬间液膜, 在保温过程中, 随着低熔点组元向母材的扩散, 液膜厚度随之减小直至消失, 再经一定时间的保温而使成分均匀化, 如图 2-3-7 所示。图中 C_i 为中间层成分, $C_{P.M.}$ 为母材成分, C_L 为液相线成分, C_S 为固相线成分, T_{mi} 为中间层熔点, T_{mb} 母材熔点, T_B 连接温度, $C'_{P.M.}$ 接头成分。与一般的固相扩散连接相比, 液体金属原子的运动较为自由, 且易于在母材表面形成稳定的原子排列而凝固, 使界面的紧密接触变得容易, 可大幅度降低连接压力。

液相扩散连接大致可分为以下 3 个阶段:

(1) 液相的生成 将中间扩散夹层材料夹在被连接表面之间, 施加一定的压力 (0.1MPa 左右), 或依靠工件自重使其相互接触。然后在无氧化或无污染的条件下加热, 当加热到连接温度 T_B 时, 形成共晶液相 (见图 2-3-7a)。

(2) 等温凝固过程 液相形成并充满整个焊缝缝隙后, 应立即开始保温, 使液-固相之间进行充分的扩散, 由于液相中使熔点降低的元素大量扩散至母材内 (见图 2-3-7b), 母材中某些元素向液相中溶解, 使液相的熔点逐渐升高而凝固, 凝固界面从两侧向中间推进 (见图 2-3-7c)。随着保温时间的延长, 接头中的液相逐渐减少, 最后形成接头 (见图 2-3-7d)。

等温凝固原理如图 2-3-8 所示, 成分为 C_0 的材料加热到 T_0 温度时, 在 A 点形成液相。由于温度保持不变, 低熔点元素 Q 将由 A 向 F 方向扩散, 当成分达到 D 点时, 界面开始凝固, 随着低熔点成分的扩散, 液相逐渐减少, 当成分扩散到 E 点时, 液相消失, 界面全部形成固相。由于液相的凝固过程是在保温中完成的, 故称为等温凝固, 而不像钎焊那样, 熔融的液态钎料是在连续冷却过程中凝固的。

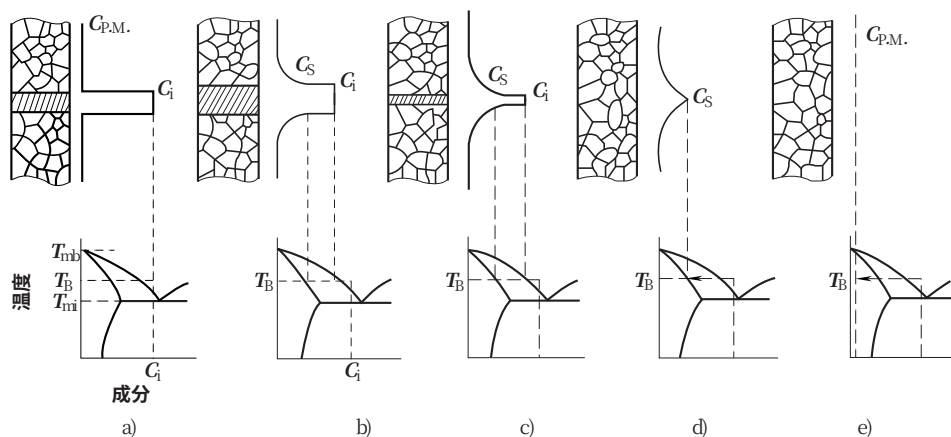


图 2-3-7 瞬时液相扩散连接过程示意图

a) 形成液相 b) 低熔点元素向母材扩散 c) 等温凝固 d) 等温凝固结束 e) 成分均匀化

等温凝固过程实际上是液相向母材迁移或两侧固相向中间液相夹层迁移的过程, 界面迁移模型如图 2-3-9 所示, 等温凝固所需的时间可以通过式 (2-3-5) 计算求得。其中, 元素浓度 C 是距离 x 和时间 t 的函数, 其边界条件为 $C(x, 0) = C_B (x > W, t = 0)$, $C(\infty, t) = C_B (x \text{ 无穷大}, 0 < t < t_F)$, $C(x, t) = C_S (x = W + 0, 0 < t < t_F)$, $C(x, t) = C_L (x \leq W + 0, 0 < t < t_F)$ 。

$$t_F = \frac{h^2}{4D\beta^2} \quad (2-3-5)$$

$$\frac{C_S - C_B}{C_L - C_S} = -\sqrt{\pi}\beta \exp\beta^2 \cdot \operatorname{erfc}(\beta) \quad (2-3-6)$$

式中 t_F ——等温凝固时间, 单位为 s;

D ——扩散系数, 单位为 mm^2/s ;

h ——液相厚度, 单位为 mm;

β ——液固界面向中间层迁移速率常数, 和 C_S 及 C_L 有关, 可由式 (2-3-6) 确定, 单位为 mm/s ;

C_L ——液相线时的成分浓度, 单位为 %;

C_S ——固相线时的成分浓度, 单位为 %;

C_B ——成分均匀化后的浓度, 单位为 %。

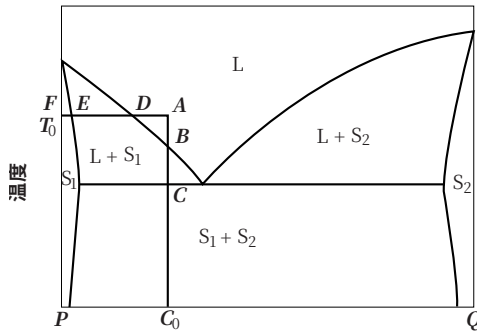


图 2-3-8 等温凝固原理图

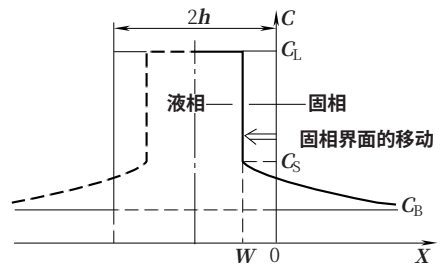


图 2-3-9 等温凝固过程中固液界面移动模型

(3) 成分均匀化 等温凝固形成的接头, 成分很不均匀。为了获得成分和组织均匀的接头, 需要继续保温扩散 (见图 2-3-7e)。这个过程可在等温凝固后继续保温扩散一次完成, 也可以在冷却以后另行加热分段完成。均匀化过程的温度与时间可根据对接头性能的要求选定。成分均匀化过程的浓度变化如图 2-3-10 所示, 任意时刻的成分 C_p 由解析式 (2-3-7) 给出, 其边界条件为 $C(x, t) = C_0 (x \leq |h|)$, $C(x, 0) = C_B (x \geq |h|)$, $C(\infty, t) = C_B$ 。

$$C_p = (C_0 - C_B) \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{2\sqrt{Dt}}\right) + C_B \quad (2-3-7)$$

3.1.3 超塑性成形扩散连接的基本原理

超塑性是指在一定的温度下, 对于等轴细晶粒组织, 当晶粒尺寸、材料的变形速率小于某一数值时 (如钛合金晶粒尺寸小于 $3\mu\text{m}$ 、变形速率 $10^{-3}/\text{s} \sim 10^{-5}/\text{s}$), 拉伸变形可以超过 100%、甚至达到数千倍, 这种行为叫做材料的超塑性行为。材料的超塑性成形和扩散连接的温度在同一温度区间, 因此可以把成形与连接放在一起进行, 而构成超塑性成形扩散连接工艺 (superplastic forming diffusion bonding, SPF/DB)。用这种新的热加工

方法可以制造钛合金薄壁复杂结构件 (飞机大型壁板、翼梁、舱门、发动机叶片), 并已经在航天、航空领域得到应用, 如波音 747 飞机上有 70 多个钛合金结构件就是应用这种方法制造的。用这种方法制成的结构件, 质量小, 刚度大, 可减轻质量 30%, 降低成本 50%, 提高加工效率 20 倍。

超塑性成形扩散连接的典型结构如图 2-3-11 所示。图 2-3-11a 是单层加强结构件, 即在超塑性成形件 5 上用扩散连接方法连接加强板 3, 以增加结构的刚度和强度。图 2-3-11b 是双层板结构, 内层板坯 8 是超塑性成形件, 6 为外层超塑性成形板坯, 在超塑性成形的地方可以出现扩散连接,

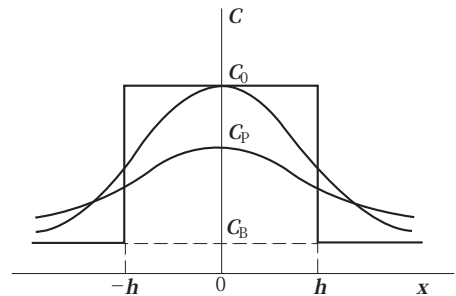


图 2-3-10 成分均匀化过程及元素的浓度分布变化

这种方法可以先成形而后再进行连接,也可以先连接而后再向6~8之间通入惰性气体,通过均匀的气压使其超塑性成形,而形成具有两层结构的构件。图2-3-11c为多层板结构,10为中间层板坯,11为超塑性成形的三层结构件,这种结构常用做飞机翼面、机身、壁板等。

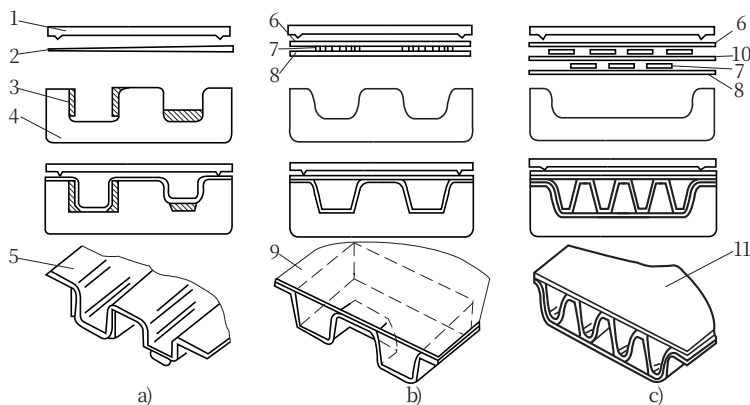


图2-3-11 典型结构的超塑性扩散连接

a) 加强板(一层) b) 整体加强结构(二层) c) 多层夹层结构(三层)

1—上模密封压板 2—超塑性成形板坯 3—加强板 4—下成形模具

5—超塑性成形件 6—外层超塑性成形板坯 7—不连接涂层区(钎基或氮化硼)

8—内层板坯 9—超塑性成形的两层结构件

10—中间层板坯 11—超塑性成形的三层结构件

3.2 扩散连接的一般工艺

3.2.1 扩散连接的工艺特点

1. 工艺特点

(1) 扩散连接技术的优点 与其他焊接方法相比,扩散连接技术有以下几方面的优点:

- 1) 接合区域无凝固(铸造)组织,不生成气孔、宏观裂纹等熔焊时的缺陷。
- 2) 同种材料接合时,可获得与母材性能相同的接头,几乎不存在残余应力。
- 3) 可以实现难焊材料的连接。对于塑性差或熔点高的同种材料、互相不溶解或在熔焊时会产生脆性金属间化合物的异种材料(包括金属与陶瓷),扩散连接是可靠的连接方法之一。

4) 精度高,变形小,精密接合。

5) 可以进行大面积板及圆柱的连接。

6) 采用中间层可减少残余应力。

(2) 扩散连接的缺点

1) 无法进行连续式批量生产。

2) 时间长,成本高。

3) 接合表面要求严格。

4) 设备一次性投资较大,且连接工件的尺寸受到设备的限制。

2. 接头形式设计

(1) 接头的基本形式 扩散连接的接头形式比熔焊类型多,可进行复杂形状的连接。平板、圆管、管、中空、T形及蜂窝结构均可进行扩散连接,实际生产中常用的接头形式如图2-3-12

所示。

(2) 扩散连接制造复合材料 在纤维强化复合材料的制造过程中,常用的加工方法之一是扩散连接,典型的制造方法如图 2-3-13 所示。

3.2.2 扩散连接参数的选择

扩散连接参数主要有温度、压力、时间、气氛环境和试件的表面状态,这些因素之间相互影响、相互制约,在选择焊接参数时应统筹考虑。此外,扩散连接时还应考虑中间层材料的选用。

1. 连接温度

连接温度 T 越高,扩散系数越大,金属的塑性变形能力越好,连接表面达到紧密接触所需的压力越小。但是,加热温度受到再结晶、低熔点共晶和金属间化合物生成等因素的影响。因此,不同材料组合的连接温度,应根据具体情况,通过实验来选定。从大量试验结果看,连接温度大都在 $(0.5 \sim 0.8)T_m$ (T_m 为母材熔化温度) 范围内,最适合的温度一般为 $T \approx 0.7T_m$ 。对瞬时液相扩散连接温度的选择,常在可生成液相的最低温度附近,温度过高将引起母材的过量溶解。

固相扩散连接时,元素之间的互扩散引起化学反应,温度越高,反应越激烈,生成反应相的种类也越多。同时,在其他条件相同时,随着温度的增加,反应层厚度越厚。图 2-3-14 是 SiC/Ti 界面的反应层总厚度与时间的关系,从图中可知,连接时间相同时,提高温度可以大幅度增加接头反应层厚度。

反应层厚度对接头强度有很大影响,接头强度是多方面因素综合作用的结果,是由各反应层本身的强度、各反应层间界面强度以及反应层与母材之间的界面强度所决定的。在其他条件一定时,连接温度与接头强度存在最佳值。锡青铜与钛扩散连接时,温度在 1073K (800℃) 以下,即使施加很大的压力,接头强度仍然很低,主要原因是温度过低,界面处于活化状态的原子少,无法形成良好的接合界面。连接温度在 1073 ~ 1093K 范围内,接头强度随温度的上升而增加 (见图 2-3-15a), 在 1093K 时达到 165MPa 的最大强度值。连接温度进一步增加,接头强度逐渐下降,由断口分析可知,接合界面出现了脆性的金属间化合物,该化合物层随温度增加而变厚,从而降低了接头强度。图 2-3-15b 是 SiC/Ti/SiC 接头强度与连接温度的关系,从图中可知,接头强度在 1373K 约 44MPa, 到 1474K 时上升到 153MPa。从 1473K 开始再升高温度到 1573K, 接头强度反而下降到 54MPa。连接温度进一步提高,接头强度又开始上升,到 1773K 时达到了 250MPa 的最大值。从断口分析可知,1473K 的断面凹凸较多, SiC 断面上粘有较多的块状反应相 $Ti_5Si_3C_x + TiC$ 。由于 TiC 和 SiC 的热膨胀系数之差最小,两者在结晶学上有很好的对应关系,故可推测出 SiC/TiC 的界面的强度高。1573K 的界面, SiC 和 $Ti_5Si_3C_x$ 单相层直接相连, SiC/TiC 的界面全部消失,再加上 $Ti_5Si_3C_x$ 相本身强度不高,和 SiC 的热膨胀系数之差也变大,从而使接头强度大大下降。获得最大强度的界面上, SiC 和 Ti_3SiC_2 直接相连,两者也有很好的结晶对应关系,故接头强度高。

由于连接温度相对于室温的温度差直接影响陶瓷/金属接头的残留应力,亦即较高的连接温度会产生较大的残留应力,因而从减小接头残留应力的角度出发,应尽量选择较低的连接温度。

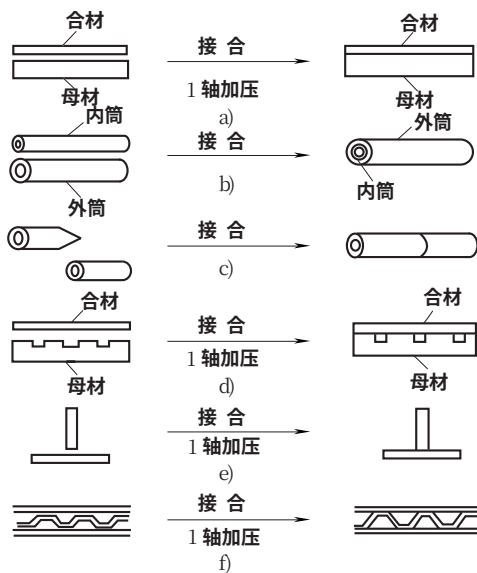


图 2-3-12 扩散连接的基本接头形式

a) 平板 b) 圆筒 c) 管
d) 中空材料 e) T 形 f) 蜂窝

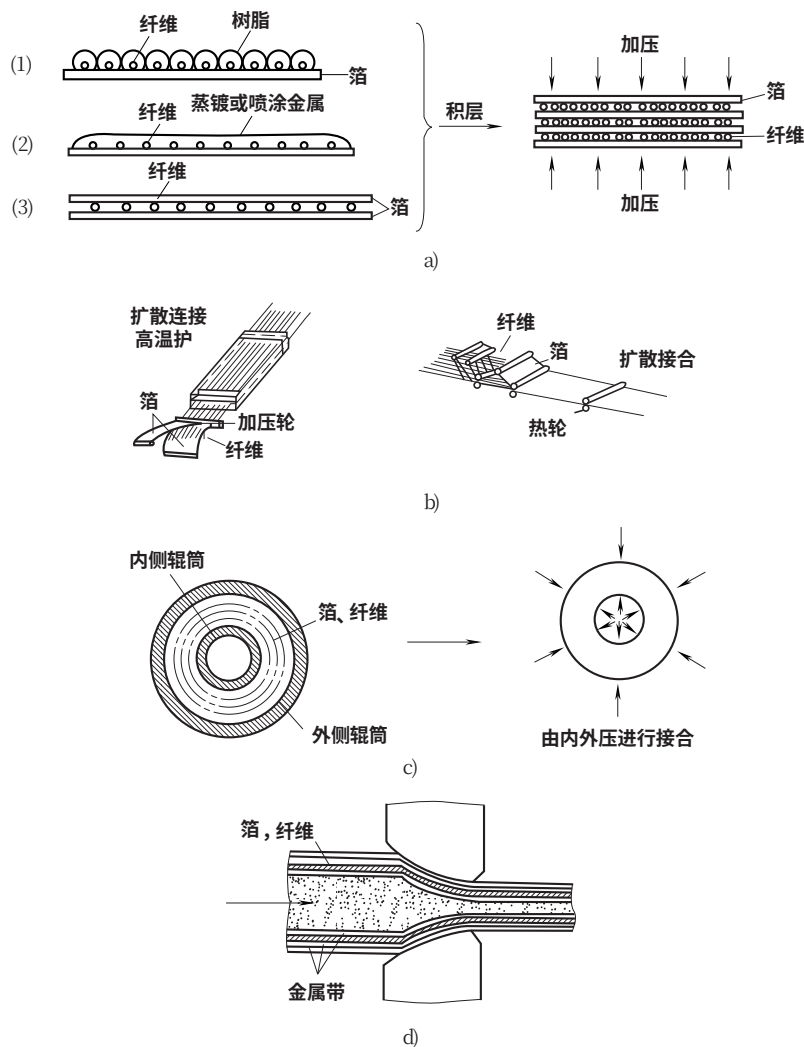


图 2-3-13 扩散连接制造纤维增强复合材料

a) 积层扩散接合法 b) 热辗压扩散法 c) 热等静压法 d) 拉伸法

2. 扩散连接时间

扩散连接时间 t （也称保温时间）主要决定原子扩散和界面反应的程度，同时也对所连接金属的蠕变产生影响。连接时间不同，所形成的界面产物和界面结构不同。扩散连接时，要求接头成分均匀化的程度越高，保温时间就将以平方的速度增长。实际扩散连接工艺中保温时间从几分钟到几小时，甚至达到几十小时。但从提高生产率考虑，保温时间越短越好。缩短保温时间，必须相应提高温度与压力。

接头强度一般是随时间的增加而上升，而后逐渐趋于稳定。接头的塑性和冲击韧度与保温扩散时间的关系也与此相似。图 2-3-16 是铜与钢接头强度与连接时间的关系，在连接时间为 20min 时得到最大值，当添加镍中间层时，接头强度有所提高，但变化趋势相同。

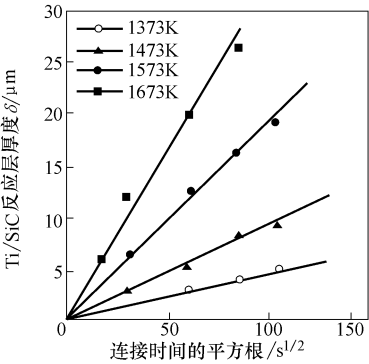


图 2-3-14 SiC/Ti 反应层厚度与温度及时间的关系

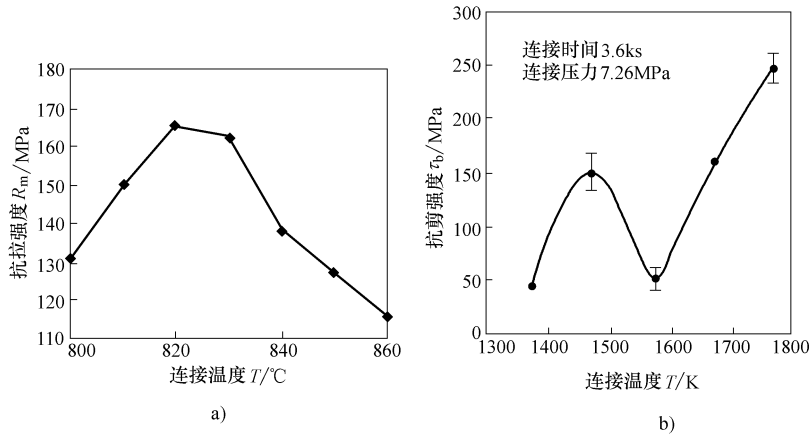


图 2-3-15 连接温度对接头强度的影响

a) 锡青铜/Ti b) SiC/Ti/SiC

与金属之间的连接相比，陶瓷与金属扩散连接所用的时间较长。连接时间的选择必须考虑到连接温度的高低。在连接温度一定时，保温时间越长，反应层越厚。图 2-3-17 是 SiC/Ti 接头的反应层厚度与连接时间的关系曲线，随着连接时间的增加，界面各反应层厚度按抛物线规律增加。同时，受反应层厚度的影响，接头性能也随连接时间的增加发生变化。如图 2-3-18 所示，SiC/Ti 扩散连接接头在反应层厚度为 $5\mu\text{m}$ 时接头抗剪强度达到 160MPa 的最大值；而对于 SiC/Cr 接头，反应层厚度为 $2\mu\text{m}$ 时接头强度最大。SiC/Nb 和 SiC/Ta 的接头强度也随反应层厚度而变化，但没有出现明显的下降。

3. 连接压力

扩散连接时单位面积上的压力 p 主要促使连接表面产生塑性变形及达到紧密接触状态，使界面区原子激活，加速扩散与界面孔洞的弥合及消失，防止扩散孔洞的产生。压力越大，温度越高，紧密接触的面积也越大。但不管压力多大，在扩散连接的初期不可能使连接表面达到 100% 的紧密接触状态，总有一小部分演变成界面孔洞。目前，扩散连接规范中应用的压力范围很宽，最小只有 0.04MPa（瞬时液

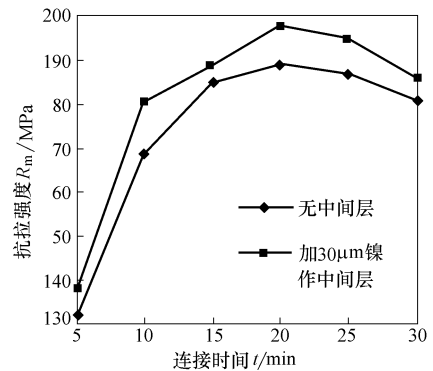


图 2-3-16 扩散连接时间对铜/钢接头性能的影响

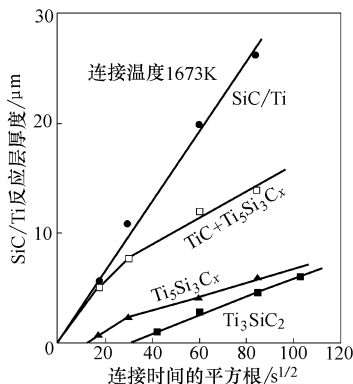


图 2-3-17 界面反应层厚度与时间的关系

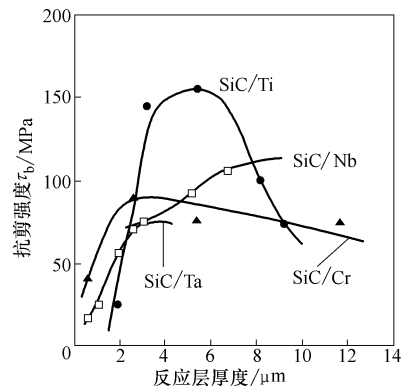


图 2-3-18 SiC-金属界面的反应层厚度与接头强度的关系

相扩散连接), 最大可达 350MPa (热等静压扩散连接), 而一般压力为 10 ~ 30MPa。

压力较小时, 增大压力可以使接头强度提高和延伸率增大, 图 2-3-19 是用 Cu 或 Ag 连接 Al_2O_3 陶瓷、用 Al 连接 SiC 时的变化趋势。与连接温度和时间的影响一样, 压力也存在最佳值, 在其他焊接参数不变的条件下, 最佳压力时接头可以获得最佳强度。另外, 压力的影响还与材料的类型、厚度以及表面氧化状态有关。

4. 环境气氛

扩散连接一般在真空、非活性气体 (Ar 、 N_2) 或大气气氛环境下进行, 一般来说, 真空扩散连接的接头强度高于在不活性气体和空气中连接的接头强度。真空中的材料在温度升高时, 气体会从零件和真空室内壁中析出, 计算和试验结果表明, 真空室内的真空度在常用的规范范围内 ($1.33 \sim 1.33 \times 10^{-3} \text{Pa}$), 就足以保证连接表面达到一定的清洁度, 从而确保实现可靠连接。

图 2-3-20 是用 Al 作中间层连接 Si_3N_4 时环境条件对接头强度的影响, 真空连接接头的强度最高, 抗弯强度超过 500MPa, 接头呈交叉状断在 Al 层和陶瓷中, Al 层中的断口为塑性, 陶瓷中的断口为脆性。在氩气保护下的接头强度虽然分散度较大 (330 ~ 500MPa), 但平均强度超过 400MPa。而在大气中连接时强度低, 只有 100MPa 左右, 断口分析发现, 接头沿 $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 界面脆性断裂, 原因是由于连接时界面发生氧化反应, 生成 Al_2O_3 氧化膜, 使接头强度降低。

在 1773K 的高温下直接扩散连接 Si_3N_4 陶瓷时, 由于高温下 Si_3N_4 陶瓷容易分解形成孔洞, 因此在 N_2 中连接可以限制陶瓷的分解, N_2 压力高时接头抗弯强度较高。例如, 在 1MPa 氮气中连接的接头抗弯强度在 380MPa 左右, 而在 0.1MPa 氮气中连接的接头, 抗弯强度下降了 1/3, 只有 220MPa。

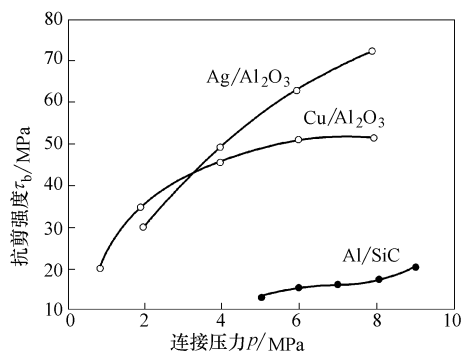


图 2-3-19 压力对接头抗弯强度的影响

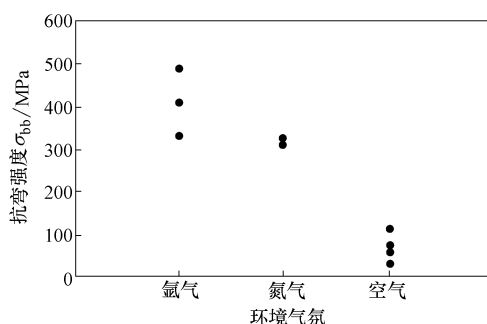


图 2-3-20 连接环境对 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 接头抗弯强度的影响

5. 表面状态

扩散连接材料的表面应光滑平整, 一般应先进行机械加工, 然后去除加工表面的油、锈及表面氧化物。

(1) 表面粗糙度的影响 几乎所有的焊接件都需要由机械加工制成, 不同的机械加工方法, 获得的表面粗糙度等级不同。扩散连接的试件一般要求表面粗糙度应达到 $Ra > 2.5 \mu\text{m}$ 以上。

扩散连接时, 被连接工件的表面粗糙度对接头的力学性能也有影响, 高温下不易变形的材料, 连接时的塑性变形小, 则要求表面粗糙度值要小一些, 一般来讲, 工件表面粗糙度 Ra 在 $0.63 \mu\text{m}$ 左右。对耐热合金与耐热钢的扩散连接, 要求表面粗糙度应达到 $Ra 0.32 \mu\text{m}$ 以上。表面加工质量越高, 即表面粗糙度越小, 越有利于结合面之间的紧密结合。图 2-3-21 是镍基合金 ЭИ893 (相当于 CrNi80WNbAlN) 表面加工状态对扩散连接接头强度的影响 (连接压力 $p = 20 \text{MPa}$), 研磨加工比车削加工能够获得更高的接头强度。同时, 适当增加扩散连接时材料的横向膨胀率, 也使接头强度

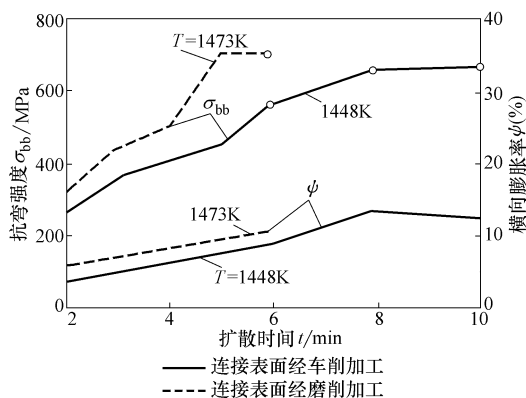


图 2-3-21 镍基合金接头抗弯强度与表面粗糙度及接头变形率的关系

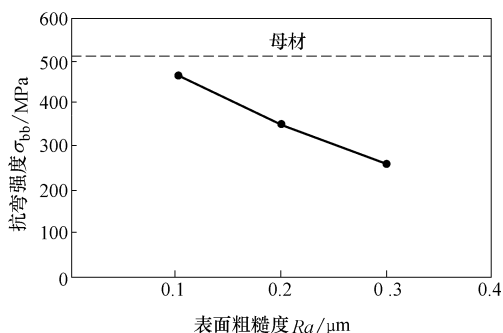


图 2-3-22 Si_3N_4 -Al 表面粗糙度对接头抗弯强度的影响

增加。

Si_3N_4 陶瓷与金属连接时，表面粗糙度对接头强度的影响十分显著，粗糙的表面会在陶瓷中产生局部应力集中而容易引起脆性破坏。 Si_3N_4 -Al 接头表面粗糙度对接头抗弯强度的影响如图 2-3-22 所示（试件的连接温度 $T = 1073\text{K}$ ，压力 $p = 0.05\text{MPa}$ ，连接时间 $t = 10\text{min}$ ），从图中可知，表面粗糙度 R_a 为 $0.1\mu\text{m}$ 时，接头强度比母材强度稍低，当表面粗糙度 R_a 由 $0.1\mu\text{m}$ 变为 $0.3\mu\text{m}$ 时，接头抗弯强度从 470MPa 降低到 270MPa 。

机械去膜是去除表面氧化物和锈蚀的最简单的方法，除机械加工外，还可使用锉刀、刮刀和砂布打磨，也可用金属丝刷、金属丝轮和砂轮去膜。对形状复杂或表面大的部件，可用喷砂或喷丸去膜，喷砂后的零件，还应作去除砂粒的补充处理。

（2）表面清理 待连接零件在扩散连接前的加工和存放过程中，被连接表面不可避免地形成氧化物、覆盖着油脂和灰尘等。在连接前需经过脱脂、去除氧化物及气体处理等工艺过程。

1) 有机溶剂脱脂：常用的有机溶剂有乙醇、丙酮、汽油、四氯化碳、三氯乙烯、二氯乙烷和三氯乙烷等。液态浸洗常以汽油为溶剂，用于小件和油污严重的情况，适合于单件和小批生产。蒸气清洗常以三氯乙烯为溶剂，用于大件和油污较轻的情况，适合于大批量生产。

2) 碱液脱脂：在碱液中清洗脱脂具有过程简单、成本低及效果好的优点。其缺点是溶液要求加热，用后难以再生以及对某些金属具有腐蚀作用。还可用电解法和超声波等方法进行脱脂处理。

3) 化学腐蚀去膜：常用的去膜液有硫酸、盐酸、硝酸、氢氟酸及其混合物的水溶液和氢氧化钠的水溶液等。

4) 离子轰击及表面改性技术去膜：表面改性技术可以用于清理及活化表面，具体过程是在低压惰性气体中用离子轰击的办法去除表面杂质，可以改善表面的凹凸不平状况。也可以用其他表面改性技术，如喷涂、电镀、蒸镀、PVC、离子镀、离子注入等。对氧化性强的材料，最好是清理后直接进行扩散连接。如需长时间放置，则应对连接表面加以保护，如置于真空或保护气氛中。

6. 中间层选择

扩散连接时，中间层材料非常重要，除了能够无限互溶的材料以外，异种材料、陶瓷、金属间化合物等材料多采用中间夹层进行扩散连接。中间层材料不仅在固相扩散连接时使用，在液相扩散连接中应用得也比较广泛。

（1）中间层的作用 中间层在扩散连接时主要起以下作用：

1) 改善表面接触,减小扩散连接时的压力。对于难变形材料,扩散连接时采用软质金属或合金作中间层,利用中间层的塑性变形和塑性流动,使结合界面达到紧密接触,提高物理接触效果和减少达到紧密接触所需的时间。同时,中间层材料的加入,使界面的浓度梯度变大,促进元素的扩散,加速扩散空洞的消失。

2) 可以抑制夹杂物的形成,促进其破碎或分解。例如,Al合金表面易形成一层稳定的 Al_2O_3 氧化物层,扩散连接时该层不向母材中溶解。可以采用Si作中间层,利用Al-Si共晶反应形成液膜,促进 Al_2O_3 层破碎。Ni基合金表面也容易形成氧化膜,扩散连接时,由于微量氧的存在,可在连接界面促进碳化物和氮化物的形成,影响接头性能。采用Ni箔作中间层进行扩散连接,可以对这些化合物的生成起抑制作用。

3) 改善冶金反应,避免或减少形成脆性金属间化合物和有害的共晶组织。异种金属材料扩散连接时,最好选用和母材不形成金属间化合物的第三者材料,以便通过控制界面反应,改善材料的连接性。例如,Fe和Ti扩散连接时,除形成Fe-Ti化合物以外,Fe中的C元素和Ti反应形成TiC。采用Ni作中间层进行扩散连接,可以抑制TiC脆性相的出现。而且,在Ni与Ti的界面上,形成Ni-Ti化合物后,接头强度比形成TiC时高。

4) 可以降低连接温度,减少扩散连接时间。例如,Mo直接扩散连接时,连接温度为 1260°C ,而采用Ti箔作中间层,连接温度只需要 930°C 。

5) 控制接头应力,提高接头强度。异种材料连接时,由于材料物理化学性能的突变,特别是因线膨胀系数不同,接头易产生很大的热应力。选取兼有两种母材性能的材料作中间层,形成梯度接头,避免或减少界面的热应力,从而提高接头强度。

(2) 中间层的选择 中间层选择应遵循以下原则:

- 1) 容易发生塑性变形,熔点比母材低。
- 2) 物理、化学性能与母材的差异比被连接材料之间的差异小。
- 3) 不与母材产生不良的冶金反应,如不产生脆性相或不希望出现的共晶相。
- 4) 不引起接头的电化学腐蚀。

中间层可采用多种方式添加,如薄金属垫片、非晶态箔片、粉末(对难以制成薄片的脆性材料)和表面镀膜(如蒸镀、PVD、电镀、离子镀、化学镀、喷镀、离子注入等)。

(3) 固相扩散连接中间层材料 在固相扩散连接中多用软质纯金属材料作中间层,常用的材料为Ti、Ni、Cu、Al、Ag、Au及不锈钢。例如Ni基超合金扩散连接时采用Ni箔,Ti基合金扩散连接时采用Ti箔。常用的中间层材料及扩散连接参数见表2-3-1。

在陶瓷与金属的扩散连接中,活性金属中间层可选择V、Ti、Nb、Zr、Hf、Ni-Cr及Cu-Ti等。为缓解陶瓷和金属接头的残余应力,中间层的选择可分为三种类型,即单一的金属中间层、多层金属中间层和梯度金属中间层。单一的金属中间层通常采用软金属,如Cu、Ni、Al及Al-Si合金等,通过中间层的塑性变形和蠕变变形来缓解接头的残余应力。例如,在进行 Si_3N_4 与钢的连接中发现,当不采用中间层时,接头中的最大残余应力为 350MPa ;当分别采用 1.5mm 厚的Cu和Mo中间层时,接头最大残余应力的数值分别降至 180MPa 和 250MPa 。多层金属中间层降低接头残余应力的效果更好,一般在陶瓷一侧施加低热膨胀系数、高弹性模量的金属,如W、Mo等;而在金属一侧施加塑性好的软金属,如Ni、Cu等。梯度金属中间层是按弹性模量或热膨胀系数逐渐变化设计的,整个中间层表现为在陶瓷一侧的部分热膨胀系数低、弹性模量高,而在金属一侧的部分热膨胀系数高、塑性好。也就是说,从陶瓷一侧过渡到金属一侧,梯度中间层的弹性模量逐渐降低,而热膨胀系数逐渐增高,这样能更有效地降低陶瓷/金属接头的残余应力,提高接头的性能。

表 2-3-1 固相扩散连接时的中间层材料及连接参数

连接母材	中间层材料	连接参数			
		压力/MPa	温度/℃	时间/min	保护气氛
Al/Al	Si	7 ~ 15	580	1	真空
Be/Be	—	70	815 ~ 900	240	非活性气体
Be/Be	Ag 箔	70	705	10	真空
Mo/Mo	—	70	1260 ~ 1430	180	非活性气体
Mo/Mo	Ti 箔	70	930	120	氩气
Mo/Mo	Ti 箔	85	870	10	真空
Ta/Ta	—	70	1315 ~ 1430	180	非活性气体
Ta/Ta	Ti 箔	70	870	10	真空
Ta-10W/Ta-10W	Ta 箔	70 ~ 140	1430	0.3	氩气
Cu-20Ni/钢	Ni 箔	30	600	10	真空
Al-Ti	—	1	600 ~ 650	1.8	真空
Al-Ti	Ag 箔	1	550 ~ 600	1.8	真空
Al-钢	Ti 箔	0.4	610 ~ 635	30	真空

(4) 液相扩散连接中间层 液相扩散连接时，除了要求中间层（钎料）具有上述性能以外，还要求与母材润湿性好、凝固时间短、含有加速扩散的元素（如硼、铍、硅等）。对于 Ti 基合金，可以使用含有 Cu、Ni、Zr 等元素的 Ti 基中间层。对 Al 及其 Al 合金，可使用含有 Cu、Si、Ag 等元素的 Al 基中间层。Ni 基超合金液相扩散连接用钎料见表 2-3-2，中间层必须含有 B、Si 等元素。

表 2-3-2 Ni 基超合金液相扩散连接用钎料

钎料	化学成分(质量分数,%)								熔化温度 /℃	钎焊温度 /℃
	Ni	Cr	B	Si	Fe	C	W	Co		
BNi74CrSiB	余量	13 ~ 15	2.75 ~ 3.50	4 ~ 5	4 ~ 5	0.6 ~ 0.9	—	—	975 ~ 1038	1065 ~ 1205
BNi75CrSiB	余量	13 ~ 15	2.5 ~ 3.50	4 ~ 5	4 ~ 5	0.06	—	—	975 ~ 1075	1075 ~ 1205
BNi82CrSiB	余量	6 ~ 8	2.75 ~ 3.50	4 ~ 5	2.5 ~ 3.5	0.06	—	—	970 ~ 1000	1010 ~ 1175
BNi92SiB	余量	—	2.75 ~ 3.50	4 ~ 5	0.5	0.06	—	—	980 ~ 1010	1010 ~ 1175
BNi93SiB	余量	—	1.5 ~ 2.2	3 ~ 4	1.5	0.06	—	—	980 ~ 1135	1150 ~ 1203
BNi68CrWB	余量	9.5 ~ 10.5	2.2 ~ 2.8	3 ~ 4	2 ~ 3	0.06	11.5 ~ 12.5	—	970 ~ 1095	1150 ~ 1200
BNi71CrSi	余量	18.8 ~ 19.5	—	9.75 ~ 10.5	—	0.10	—	—	1080 ~ 1135	1150 ~ 1205
150	余量	15.0	3.5	—	—	0.10	—	—	1055 ~ 1105	1065 ~ 1200
160	余量	10.0	2.0	2.5	2.5	0.45	—	—	970 ~ 1160	1150 ~ 1200
170	余量	11.5	2.5	3.25	3.5	0.55	16	—	970 ~ 1160	1150 ~ 1200
180	余量	5.0	1.0	3.00	3.50	0.25	—	—	970 ~ 1180	1175 ~ 1230
200	余量	7.0	3.2	3.50	3.00	0.10	6	—	975 ~ 1040	1065 ~ 1175
BCol ^①	16 ~ 18	18 ~ 20	0.7 ~ 0.9	7.5 ~ 8.5	1.0	0.35 ~ 0.45	3.5 ~ 4.5	余量	1121 ~ 1149	1149 ~ 1232

① BCol 是铬基钎料。

3.3 常用材料的扩散连接

3.3.1 钛合金及钛铝金属间化合物的扩散连接

1. 钛合金的扩散连接

纯钛是一种银白色的金属，密度为 4.5g/cm³，是铁的 57%。钛合金的工作温度可达 723 ~ 773K（450 ~ 500℃），耐蚀性好，在 300 ~ 500℃的工作温度下耐蚀性与不锈钢相当。钛合金在航空

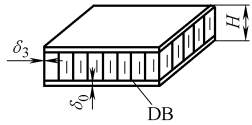
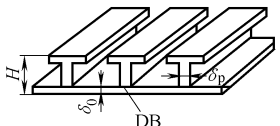
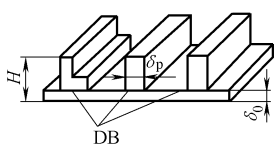
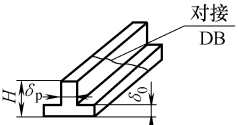
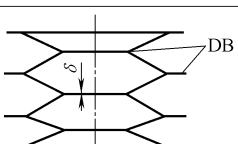
航天领域常用来制造压力容器、储箱、发动机壳体、卫星壳体、构架、发动机喷管延伸段。Apollo 登月飞船上的压力容器，70% 以上是用钛合金制造的。

钛合金扩散连接时，Ti 表面的氧化膜在高温下可以溶解在母材中，在 5MPa 的气压下，可以溶解 TiO₂ 的质量分数达 30%，故氧化膜不妨碍扩散连接的进行。相同成分的钛及其合金扩散连接接头组织中没有原始界面的痕迹。

钛合金能吸收大量的 O₂、H₂ 和 N₂ 等气体，不宜在 H₂ 和 N₂ 气氛中进行扩散连接，应在真空状态或氩气保护下进行。连接温度应选取比钛合金 β 相转变温度（1269K）低 50℃，优选的温度范围为 1123 ~ 1273K，连接时间以 15 ~ 30min 为宜，连接压力可选 2 ~ 30MPa。对于大面积钛合金扩散连接，可采用加中间层进行扩散钎焊，中间层主要采用 Ag 基钎料、Ag-Cu 钎料、Ti 基钎料。由于 Cu 基钎料和 Ni 基钎料容易和 Ti 发生反应形成金属间化合物，一般不作中间层或钎料使用。

航空航天领域典型钛合金扩散连接构件的形式见表 2-3-3，主要用于蜂窝结构、网格芯、薄壁夹层平面和曲面壁板、各种截面的带肋壁板、薄壁波纹管和变截面长型材毛坯。表中 DB 表示焊缝位置，H 表示构件高度，δ_p、δ₀ 和 δ₃ 分别表示底板、肋板和蜂窝板的厚度。

表 2-3-3 典型扩散连接构件

结构种类	简图	几何参数	连接压力 <i>p</i> /MPa	扩散连接方法
蜂窝壁板		$H/\delta = 200$ $H = 10 \sim 80\text{mm}$ $\delta_0 = 0.5 \sim 2\text{mm}$ $\delta_3 = 0.1\text{mm}$	0.5	真空加压
带长桁壁板		$H/\delta = 5 \sim 200$ $H = 50 \sim 100\text{mm}$ $\delta_p = 5 \sim 15\text{mm}$ $\delta_0 = 10 \sim 20\text{mm}$	2 ~ 20	隔膜加压
带筋壁板毛坯		$H/\delta = 1 \sim 5$ $H = 50 \sim 200\text{mm}$ $\delta_p = 15 \sim 200\text{mm}$ $\delta_0 = 20 \sim 50\text{mm}$	10 ~ 50	压床加压
梁缘条型变截面长型材毛坯		$H/\delta = 3 \sim 20$ $H = 50 \sim 200\text{mm}$ $\delta_p = 10 \sim 50\text{mm}$ $\delta_0 = 10 \sim 50\text{mm}$	10 ~ 30	压床加压
薄壁波纹管		$\delta = 0.5 \sim 1\text{mm}$ $\phi = 1000 \sim 500\text{mm}$	10 ~ 30	压床加压

钛合金（TC4）的扩散连接参数规范比较宽，温度范围为 850 ~ 930℃，压力为 1 ~ 3MPa，保温时间为 30 ~ 90min，应在真空度为 1.33 × 10⁻³ Pa 左右或氩气保护下连接，接头强度可达母材的 90% 以上。

钛合金应用最普遍的连接方法是超塑成形扩散连接（SPF/DB），所选择的温度与通常扩散连接所用的温度大体一致，但变形速率应小于一定的数值，所加的压力也比较小，同时压力与时间有

一定的联系。为了达到 100% 的连接, 必须保证连接面可靠接触, 接头连接质量与压力和时间关系如图 2-3-23 所示。在实线以上为能够获得可靠连接的区域, 在虚线以下不能获得良好的接头质量, 接头连接率小于 50%。

钛合金原始晶粒度对扩散连接的质量也有影响, 如图 2-3-24 所示。从图中可知, 原始晶粒越细, 获得良好扩散连接接头所需要的时间越短、施加的压力也越小, 因此, 超塑性成形扩散连接工艺要求钛合金母材必须具有细晶组织。

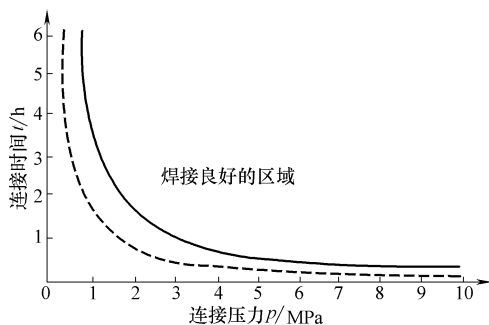


图 2-3-23 超塑性成形扩散连接接头质量与压力及时间的关系

($T = 1212\text{K}$, 真空度小于 $1.33 \times 10^{-3}\text{Pa}$)

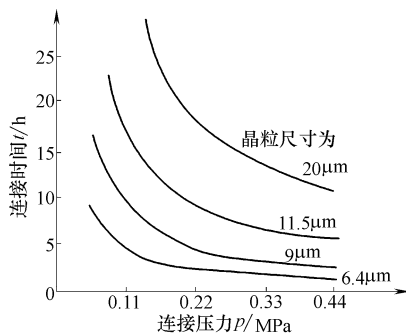


图 2-3-24 钛合金的晶粒度对连接时间和压力的影响

2. Ti_3Al 金属间化合物的扩散连接

Ti_3Al 具有良好的高温性能 ($1073 \sim 1123\text{K}$), 与镍基高温合金相比可减轻重量 40%。美国已将 Ti_3Al 用于制造喷气涡轮发动机上的尾喷燃烧器。

图 2-3-25 是连接温度 1263K 和 12MPa 压力条件下连接时间对抗剪强度的影响。随着连接时间从 15min 提高到 30min , 接头的抗剪强度迅速提高, 连接时间超过 30min 之后, 接头强度的上升速度变慢。当连接时间为 70min 时, 接头的强度接近母材, 但连接时间继续增加, 由于晶粒的粗化和长大, 接头的强度反而降低。图 2-3-26 是连接温度对接头抗剪强度的影响 (连接压力为 9MPa , 连接时间为 30min)。在 $1073 \sim 1113\text{K}$ 温度范围内, 接头的强度较低且变化缓慢; 连接温度超过 1113K 时, 接头的强度迅速提高; 在 1213K 时达到 751MPa 。

对接头组织进行分析可知, 连接温度在 $1083 \sim 1143\text{K}$ 、压力为 6MPa 时, 由于 Ti_3Al 金属间化合物的高温屈服强度高, 材料的表面很难微屈服和接触紧密, 因而接合界面处存在许多空洞等缺陷。随着连接温度的升高, 材料的高温屈服强度下降, 界面处产生的空洞明显减少, 在连接温度为 1213K 时, 几乎未见空洞的存在。当连接温度为 1263K 、连接时间提高到 70min 时, 两侧的母材晶粒向界面长大, 由于产生再结晶过程和晶界迁移而使界面明显消失。

Ti_3Al 合金表面的粗糙度不同, 扩散连接时所需的临界压力也不同, 在同样连接温度和时间下, 表面粗糙度为 $Ra0.2\mu\text{m}$ 的试件, 完全焊合所需的压力比 $Ra1\mu\text{m}$ 试件所需的压力要低。而在同样压力下, 达到完全焊合时, 表面粗糙度值越大, 所需的温度就较高。而且 Ra 越小, 其完全焊合区就越大, 越易于进行扩散连接。当主要工艺条件 p 、 T 中的一个参数一定时, Ra 越小可以适当降低另一个的参数值。因此, 在进行 Ti_3Al 的扩散连接时, 应尽量降低 Ra 值。

Ti_3Al 合金的超塑成形扩散连接温度范围通常在 1273K 左右, 所需的连接时间根据连接温度而定。图 2-3-27 是温度与连接时间的关系曲线, 从图中可以看出, 在压力不变的情况下, 随着温度的升高可适当减少扩散连接时间。

图 2-3-28 是 Ti_3Al 超塑性成形扩散连接压力和时间的关系曲线, 其连接条件为 $T = 1253\text{K}$ 、 $Ra = 0.2\mu\text{m}$ 。图 2-3-28 中曲线的右上方为完全焊合区, 左下方区间内的连接规范不能获得完全焊合

的接头。由图 2-3-28 中的曲线可看出提高扩散连接压力能显著缩短扩散连接时间,同时还可以看出只要压力选得很高,扩散时间可以很短。但压力太大容易对扩散连接带来许多不利影响,因此在实际生产中一般不采用这种连接参数。

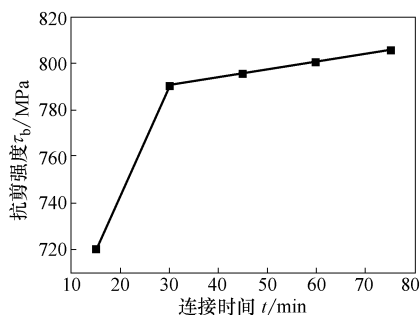


图 2-3-25 扩散连接时间对接头抗剪强度的影响

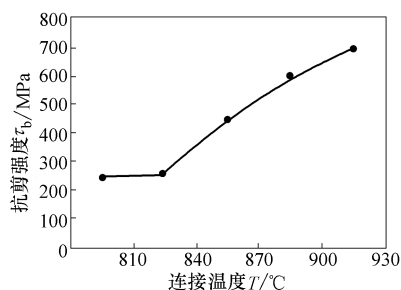


图 2-3-26 扩散连接温度对接头抗剪强度的影响

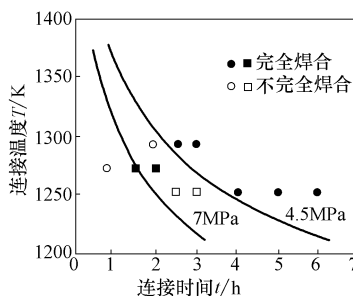


图 2-3-27 Ti_3Al 扩散连接时间与温度的关系

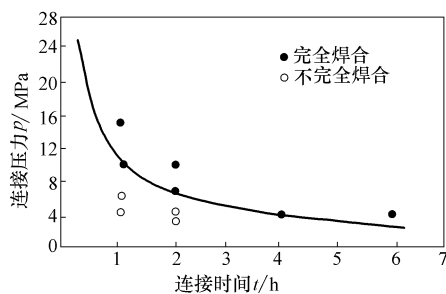


图 2-3-28 Ti_3Al 扩散连接时间与压力的关系

3. TiAl 金属间化合物的扩散连接

TiAl 扩散连接能够得到与母材组织和性能基本相同的接头,当对 $\text{Ti-52\%Al}$ (摩尔分数) 铸造合金直接进行扩散连接时,发现连接界面处产生细小晶粒的 γ 单相组织和 $(\gamma + \alpha_2)$ 双相组织。采用 $25\mu\text{m}$ 厚的金属钒 (V) 中间层进行扩散连接 TiAl , 发现在 V/γ 的界面处形成 Al_3V 相, 如果 V 层很薄, 能够全部溶入 TiAl 中, 从而使 Al_3V 仅仅成为一个中间过渡相而最后不再存在。

连接温度对接头强度有很大影响, 当温度较低或连接时间较短时, 界面处存在显微孔洞和 TiO_2 及 Al_2TiO_5 薄膜。而当扩散连接在 1473K 及 3.84ks 条件下进行时, 以上微孔和氧化膜均不存在, 接头的室温性能最好, 抗拉强度达 225MPa , 如图 2-3-29 所示, 断裂发生在母材上。但当连接温度为 1073K 和 1273K 时, 由于界面上元素扩散及迁移不充分, 接头的抗拉强度比母材低约 40MPa 。

在 $1198 \sim 1373\text{K}$ 温度范围内, 对 $(\gamma + \alpha_2)$ 层片状组织的 TiAl 锻造合金 (含 Al 摩尔分数 47% , 还含少量的 Cr 、 Mn 、 Nb 、 Si 和 B) 进行了扩散连接。连接温度较低时, 可以观察到原始的连接界面, 接头的抗拉强度和伸长率较低, 断裂发生在界面处。随着连接温度的升高, 原始的连接界面处发生动态再结晶, 形成等轴的 γ 晶粒, 界面线消失。母材的原始晶粒尺寸对扩散连接影响很大, 晶粒

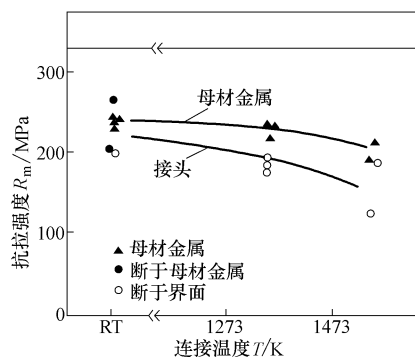


图 2-3-29 不同温度下 TiAl 接头和母材的抗拉强度

(连接条件: $T = 1473\text{K}$, $t = 3.84\text{ks}$, $p = 15\text{MPa}$, 真空度 $2.6 \times 10^{-2}\text{Pa}$)

粗大时，界面处形成与母材组织不同的再结晶细晶组织，且存在显微孔洞，抗拉强度和伸长率都低；当粗晶的 TiAl 合金与细晶双态组织的 TiAl 合金进行连接时，形成镶嵌式的界面结构，从而使接头的抗拉强度和伸长率提高；当细晶的 TiAl 合金进行连接时，可得到与母材基本一致的显微组织，接头达到 530MPa 的抗拉强度和较高的伸长率，断裂发生在母材上。真空度对接头高温抗拉强度有一定的影响，因此在其他条件不变的前提下，TiAl 金属间化合物应尽量采用较高的真空度进行扩散连接。此外，扩散连接接头经过真空热处理后，晶粒发生长大现象。

3.3.2 镍基高温合金的扩散连接

镍基高温合金的热强性好、变形阻力大，扩散连接时要实现可靠的物理接触，必须提高连接温度或增大连接压力（Ni 本身为立方晶格，原子排列密集，自由扩散能力差）。特别是镍基高温合金表面含有 Ti 和 Al 的氧化膜，而且 Ni 在高温下也容易生成 NiO，这些氧化膜性能都比较稳定，增加了扩散连接的难度。

1. 直接扩散连接

经过磨光、清洗的表面，可在真空中直接进行扩散连接，表 2-3-4 给出了几种高温合金的扩散连接参数。图 2-3-30 是 БЖ98Ni（国内牌号 GH3044）高温合金扩散连接参数对接头力学性能的影响，图中 A 为伸长率， ε 为变形率， R_m 为抗拉强度。其连接温度范围为 1173 ~ 1473K，连接压力为 5 ~ 25MPa，连接时间为 10 ~ 30min，真空度为 10^{-2} Pa。从图 2-3-30 中可知，随着温度、压力和时间增加，接头性能逐渐提高。通过分析可知，其最佳连接参数为 $T = 1423 \sim 1473\text{K}$ 、 $p = 20 \sim 25\text{MPa}$ 、 $t = 30\text{min}$ 、真空度为 10^{-2}Pa 。

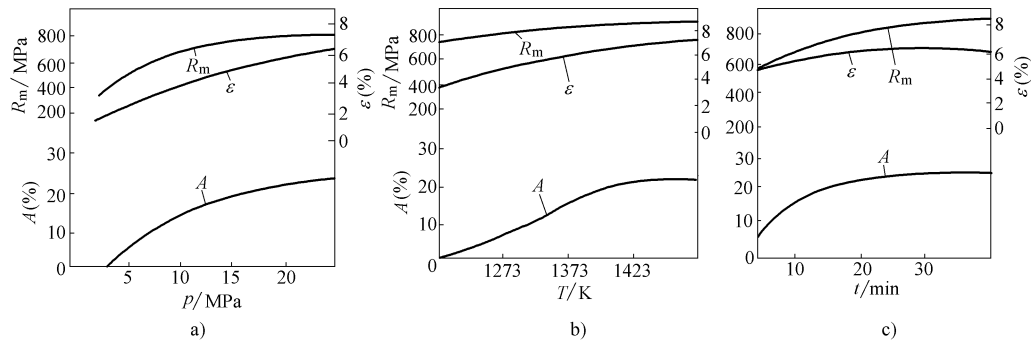


图 2-3-30 高温合金扩散连接参数对接头力学性能的影响（GH3044）

a) 压力 b) 温度 c) 时间

表 2-3-4 高温合金的扩散连接参数

材 料	温度/K	压力/MPa	时间/min	真空度/Pa
Ni	1273	15	10	10^{-2}
XH80TiNbM(GH3044)	1473	20	6	1.33×10^{-2}
XH65WMoTiAl(GH4037)	1348	20	20	1.33×10^{-2}
ЖС6К(GH2130)	1273	20	10	1.33×10^{-2}
XH75MoNbTiAl(俄罗斯)	1423 ~ 1448	20 ~ 30	6	1.33×10^{-2}
ЭП99(俄罗斯, 镍占 50%, 添加元素为钼、钨、钽、钛、铝等)	1423 ~ 1448	35 ~ 40	6	1.33×10^{-2}
ТЭ- Ni, (俄罗斯, 选 Co 合金中间层)	1366	135	120	1.33×10^{-2}
XH77TiO(俄罗斯)	1323 ~ 1373	30	5	1.3×10^{-2}
XH75MoNbTiAl + ЭП99(蒸镀 Mg)	1473	10 ~ 15	6	1.3×10^{-2}
XH73MoNbTiAl (加 ЭП99 中间层)	1423 ~ 1448	10 ~ 15	6	1.3×10^{-2}

在确定的温度和确定的时间下, 试件不被破坏的最大应力称为高温持久强度。图 2-3-31 是 CrNi80WBAI 的持久强度试验结果, 试件经过 1273K、2h 和 1723K、20h 保温处理, 在 973K 下进行持久强度试验, 得到 12000h 的持久强度为 160MPa 左右。

2. 加中间层的扩散连接

镍基合金在扩散连接时, 为了实现良好的接触和提高接头性能, 常在接合界面处添加中间层材料。接头性能除了受连接参数的影响外, 中间层厚度对接头性能也有影响。图 2-3-32 为不同连接参数下的接头强度与中间层相对厚度的关系, 其中连接压力为 20MPa、连接时间 15min, x 为中间层的相对厚度 (中间层绝对厚度和试件直径的比值)。

经断口分析发现, 连接温度为 1323K 时, 接头在界面破坏, 局部没有很好地接触, 有机械加工的痕迹; 在温度为 1363K 时, 破断发生在母材上, 中间层有很大的塑性变形, 因此 $x = 0.05$ 可以认为是厚度的临界值。当 $x < 0.05$ 时, 脆性破断发生在界面, 连接区物理接触不良, 要实现可靠接触必须提高连接温度 T 或连接压力 p 。当连接温度达到 1403K 时, 由于高温减小了材料的变形阻力, 只有 $x < 0.02$ 时才出现脆性破坏, 接头强度高。

当连接压力提高到 40MPa 时, 所有温度下各种厚度的中间层都提高了接头强度, 说明连接过程中物理接触变好, 在 $x = 0.02 \sim 0.05$ 范围内, 断裂均在母材上发生。由此说明, 中间层厚度小时由于变形阻力大, 表面物理接触不良, 接头性能不好; 厚度过大时, 软中间层承受了所有的应力, 也使接头性能降低。

图 2-3-33 显示出中间层相对厚度与接头高温强度的关系, 试验用材料为 GH130, 中间层采用 Ni80-Co20 合金, 扩散连接参数为 $T = 1393K$ 、 $p = 30MPa$ 、 $t = 20min$ 。从图中可知, 当相对厚度为 0.2 时, 1173K 的高温强度达到 400MPa, 接头可得到较好的高温性能及扩大了中间层厚度的范围。此外, 中间层成分对接头高温持久强度有很大影响, 采用纯 Ni 中间层连接 GH130 镍基合金, 由于 Al、Ti 的扩散, 接头区出现了粗大的 γ' 相, 接头性能明显变脆, 在 50MPa 应力、1073K 的试验温度

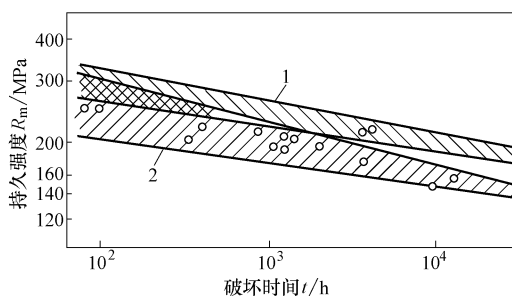


图 2-3-31 高温合金及接头的持久强度
1—母材 2—接头

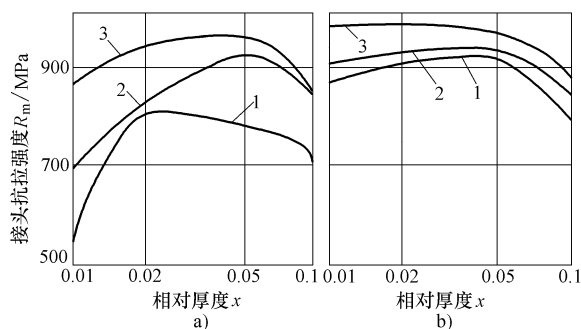


图 2-3-32 接头强度与中间层相对厚度的关系

a) $p = 20MPa$ b) $p = 40MPa$
1—1323K 2—1363K 3—1403K

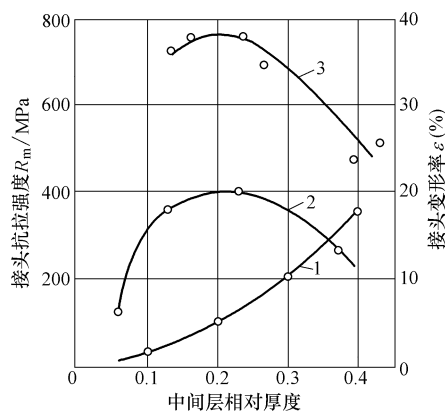


图 2-3-33 中间层相对厚度与 GH130 接头抗拉强度的关系

1—接头变形率 2—试验温度 1173K 时的 R_m
3—室温接头的 R_m

下,接头只能持续 10min,而不加中间层的接头持续时间可达 100h 以上。从图 2-3-33 中还可以看出,接头的变形率随中间层相对厚度的增大而上升。中间层的尺寸和成分对接头脆性有很大的影响,当 α 很小时,接头呈脆性破坏,韧性很差。

3. 液相扩散连接

液相扩散连接是高温合金最常采用的一种连接方法,通过选择 B、P、C、Si、Ti、Al 等元素活化表面和降低连接温度,实现等温凝固和成分均匀化,得到与母材基本相同的组织成分。同时,可以得到变形小、强度高的接头。

液相扩散连接时施加压力是为了保持工件配合面的良好接触,一般选 0 ~ 0.01MPa。如果要求接头与母材等强度,并且要求加热温度不影响母材性能,则应采用 $T \geq 1423\text{K}$ 的高连接温度,接合时间可选 8 ~ 24h。如果接头质量要求不高,或者母材不能经受太高的热循环,则温度范围为 1373 ~ 1423K,接合时间为 1 ~ 8h。例如,Inconel 713C 合金 (K18),液相扩散连接的一般参数为 1368K 和 4h。

4. 定向凝固镍基高温合金的过渡液相扩散连接

近年来,定向凝固及单晶镍基合金发展很快,在飞机发动机及地面燃气轮机制造领域具有广阔的应用前景。

采用 0.04mm 厚的非晶态箔带(将 DZ22 合金中的 Al、Ti 去掉后加入质量分数为 3.0% ~ 5.0% 的 B 元素)对 DZ22 定向凝固高温合金进行液相扩散连接,经 36h 保温后,接头中的 $\gamma + \gamma'$ 基体与母材基体之间无明显界线。对 1483K、24h 条件下的连接接头进行了高温持久强度试验,试验温度 1253K、试验载荷 186MPa,其持续时间为 80 ~ 116h,接头的持久强度相当于母材的 90%。其原因是非晶态中间层成分均匀,厚度较薄,接头中液相很少,再加上元素 B 的总量很少,大大降低了接头的脆性。

定向结晶的高温合金、母材及接头有一定的方向性,沿结晶方向强度高,而与晶粒垂直方向的强度较低。图 2-3-34 是定向凝固 MA754 (20Cr-0.5Ti-0.3Al-0.6Y₂O₃-Ni 基)合金接头的高温强度与断裂时间的关系,连接温度为 1473K、连接时间为 1h、压力为 0.98MPa,高温试验温度为 1255K。图 2-3-34 中的 L 为沿结晶方向的抗拉强度, T 为垂直结晶方向的抗拉强度。

5. 镍基高温合金扩散连接实例

汽轮机耐高温部件多采用镍基合金或镍基超合金制造,动翼要求有良好的高温强度和抗疲劳性能,在制造时需将叶冠和本体进行液相扩散连接。采用添加元素 B 和 Si 的 Ni 基合金,连接过程如图 2-3-35 所示。将中间层放置在叶冠和本体中间,在 1423K 温度下使中间层熔化,然后在 1473K 下进行等温凝固,使元素 B 充分扩散,最后形成组织均匀、接头性能满足要求的构件。

3.3.3 异种金属材料的扩散连接

1. 常用异种金属的扩散连接

(1) 连接工艺 在实际生产中,为了获得某些功能或减轻构件重量,经常需要将不同的金属材料进行连接,由于异种材料在物理性能和化学性能方面存在着很大差异,界面反应非常复杂,例如铝与不锈钢连接时,界面生成了 FeAl、FeAl₃ 和 Fe₂Al₃ 等金属间化合物。因此,异种金属常采用扩散连接或楔形热压扩散连接。典型异种金属的扩散连接工艺见表 2-3-5。

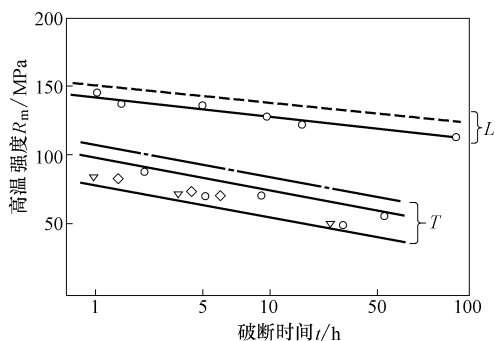


图 2-3-34 MA754 接头的高温特性

(2) 铝与不锈钢的热压扩散连接 在航天器、制氧机设备中常常要求把铝合金管与钢管（或钛合金）连接在一起，常用的接头形式如图 2-3-36 所示，图中 d 为管的内径， δ 为钢管或钛管的壁厚， δ_{Al} 为铝合金管的壁厚。

不锈钢的连接部分被加工成带有一定角度的楔形，在真空或在空气中加热铝和不锈钢毛坯，然后将不锈钢压入铝中，而后冷却并加工成需要尺寸的构件或管接头。在空气中加热铝与不锈钢时，两个毛坯加热的温度不一样，必须分别加热。如果在空气炉中提高不锈钢的加热温度，则不锈钢表面变色，说明有明显的氧化，从而影响接头的强度，最好在真空中加热。铝的合适加热温度较高，铝加热温度对接头性能的影响如图 2-3-37 所示，图中 a_B 和 a_K 分别表示接头的悬臂静弯韧度和悬臂冲击韧度。

不锈钢件压入速度对接头性能有一定的影响，压入速度一般在 45 ~ 50mm/min 范围内可以得到好的结果。试验结果可知，对 5A03 铝合金与不锈钢（1Cr18Ni9Ti）接头在 723K、保温 48h 后才出现铝-铁金属间化合物；在 773K、保温 2h 就可以出现铁-铝金属间化合物；823K、保温 15min 即出现金属间化合物；848K、保温 180s 出现金属间化合物。只有金属间化合物的厚度达到一定的数值，才对接头性能造成明显的影响。

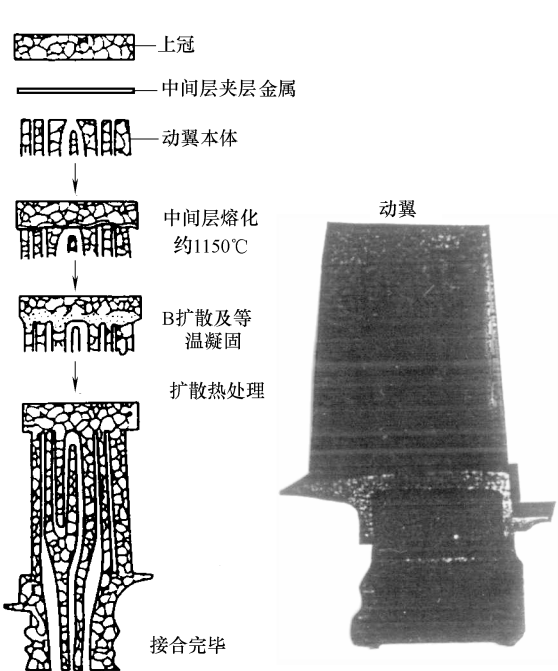


图 2-3-35 汽轮机动翼液相扩散连接过程示意图

表 2-3-5 常用异种金属的扩散连接参数

序号	被焊材料	连接温度 /℃	连接压力/MPa	保温时间 /min	真空度 /10 ⁻³ Pa
1	Al + Cu	500	9.8	10	6.67
2	5A06 铝合金 + 不锈钢	550	13.7	15	13.3
3	Al + 钢	460	1.9	15	13.3
4	Cu + 低碳钢	850	4.9	10	—
5	Cu + Ti	860	4.9	15	—
6	Cu + Mo	900	72	10	—
7	Cu + 95 瓷	950 ~ 970	77.8 ~ 11.8	15 ~ 20	6.67
8	QCr0.8 + 高 Cr-Ni 合金	900	1	10	—
9	QSn10-10 + 低碳钢	720	4.9	10	—
10	Ti + 不锈钢	770	—	10	—
11	可伐合金 + Cu	850	4.9	10	—
12	可伐合金 + 青铜	950	6.8	10	1.33
13	硬质合金 + 钢	1100	9.8	6	13.3

(3) 铜与钢的扩散连接 飞机发动机的精密摩擦副、止动盘等构件要求将锡青铜和钢连接在一起，该类材料采用熔焊容易产生气孔，采用钎焊方法会降低接头的耐蚀性，因此，常常采用扩散连接。

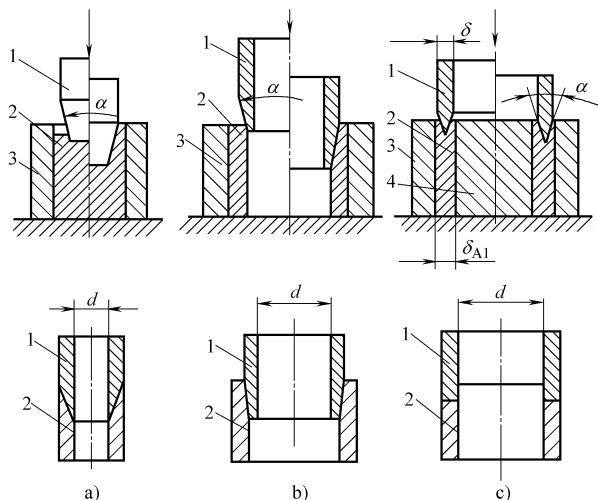


图 2-3-36 铝与不锈钢管热压扩散连接示意图

a) 直径 < 20mm b) 直径 > 20mm c) 直径 > 50mm

1—不锈钢或钛合金 2—铝合金 3—夹具 4—垫块

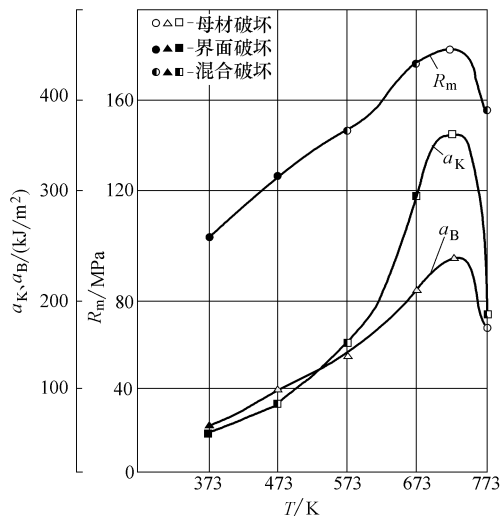


图 2-3-37 铝加热温度与接头强度的关系

(不锈钢在空气中加热到 573K)

图 2-3-38 是接头强度与连接温度的关系，扩散连接温度在 800℃ 以下时，即使施加很大的压力，接头强度仍然很低，主要是连接温度过低，界面处于活化的原子少，不能进行良好的扩散。在温度为 830 ~ 850℃ 时接头强度比较稳定，接头断口的金相照片显示出均匀分布的韧窝。当温度达到 860℃ 时，由于锡青铜中锡、铅等低熔点合金元素产生了烧蚀，再加上不同元素的扩散速度不同，加大了金属间化合物层的长大，从而使接头强度降低。试验表明，锡青铜与钢的合适参数为：连接温度 820 ~ 850℃、连接压力 1 ~ 2MPa、连接时间 15 ~ 25min。

2. TiAl 与金属的扩散连接

(1) TiAl 与 40Cr 钢的扩散连接 图 2-3-39 是不同连接温度下的 TiAl/40Cr 接头的金相照片。由图 2-3-39 可见，界面出现了明显的反应层。比较图 2-3-39a 和 b 可知，两种参数下的界面结构及组织形态是不同的。在 $T = 1173\text{K}$ 时，连接界面处可以观察到三个反应层，即靠近 TiAl 侧 I 层，中间亮白色的 II 层和靠近 40Cr 侧 III 层。

元素的成分结果，I 层主要以 Ti、Fe、Al 三种元素为主，II 层为高 Ti 和高 C 层，III 层为高 Fe 层。由 X-射线衍射结果并结合前述的能谱分析、EPMA 元素线分析可知，界面处生成了 TiC、Ti₃Al 及 FeAl、FeAl₂ 四种化合物，可判断出 I 层为 Ti₃Al + FeAl + FeAl₂ 的混合层；II 层为 TiC 层，是由从 40Cr 中扩散过来的 C 和从 TiAl 侧扩散过来的 Ti 原子相结合而形成的；III 层为溶解有少量 Al 的铁基脱碳固溶层。

图 2-3-40 为在温度 1373K 接合条件下各反应层的厚度随接合时间的变化曲线。由图可见，随着连接时间的增长，各反应层出现不同程度的长大。在三个反应层形成及长大初期，以脱碳层的长大速度为最快，这主要是 C 向 TiAl 侧优先快速扩散的结果。随接合时间的增长，特别是在扩散连接的中后期，TiC 的成长受到 C 及 Ti 来源的限制，即 40Cr 中的 C 必须先通过脱碳层才能到达 TiC

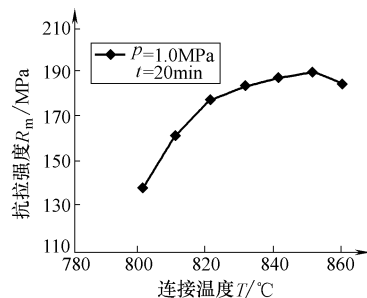


图 2-3-38 连接温度对锡青铜/钢接头强度的影响

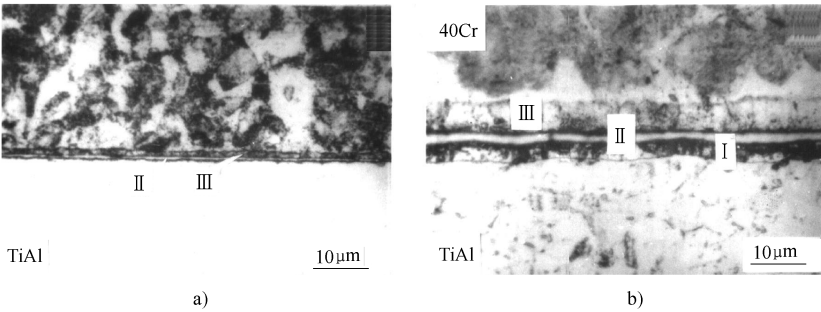


图 2-3-39 TiAl/40Cr 接头的金相照片 (×750)
a) $T = 1173\text{ K}$, $t = 30\text{ min}$ b) $T = 1323\text{ K}$, $t = 30\text{ min}$

区参与反应，而从 TiAl 侧扩散来的 Ti 元素，也必须先通过 $\text{Ti}_3\text{Al} + \text{FeAl} + \text{FeAl}_2$ 层到达 TiC 区的另一侧。由于它们的扩散系数发生了变化，使 TiC 的成长发生变化，在图 2-3-40 中表现为成长曲线出现了转折，成长速度减慢。同理，脱碳层的成长速度也发生了类似的变化。而最后出现的 $\text{Ti}_3\text{Al} + \text{FeAl} + \text{FeAl}_2$ 层的长大速度没发生变化。试验结果表明在多元多相系统中，反应相的生成顺序不同，新相的出现对即存相的成长速度有影响，这与 SiC/Ti 界面反应相的成长规律很相似。

图 2-3-41 是不同连接温度下，TiAl/40Cr 界面总反应层的厚度随时间的变化，由文献可知，反应层的成长规律可用式 (2-3-8) 和式 (2-3-9) 表示。

$$x^2 = kt \tag{2-3-8}$$

$$k = k_0 \exp(-Q/RT) \tag{2-3-9}$$

- 式中 x ——反应层的厚度，单位为 m；
 t ——加热时间，单位为 s；
 T ——加热温度，单位为 K；
 k ——反应层的成长速度，单位为 m^2/s ；
 k_0 ——成长常数，单位为 m^2/s ；
 Q ——反应层成长能，单位为 kJ/mol；
 R ——气体常数，单位为 $8.314\text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$ 。

将试验测得的不同温度、不同时间的反应层总厚度值代入公式中进行计算，可求出反应层的成长能 Q 和成长常数 k_0 ，由此可得到 TiAl/40Cr 钢界面总反应层的成长方程式 (2-3-10)，利用此方程可对界面总反应层的成长进行预测。

$$x^2 = 4.6 \times 10^{-5} \exp(-211.9/RT) t \tag{2-3-10}$$

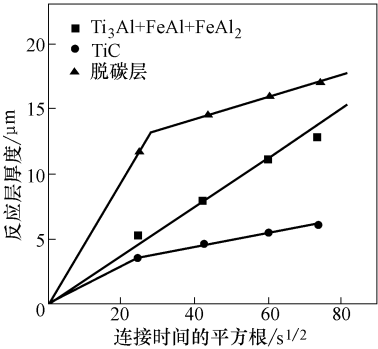


图 2-3-40 各反应层厚度随接合时间的变化

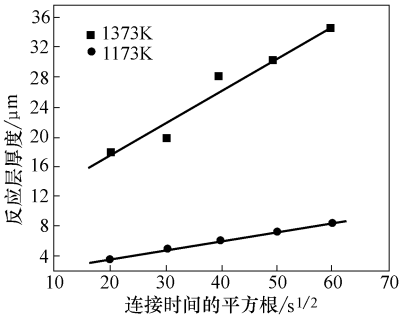


图 2-3-41 反应层总厚度随时间的变化

脆性化合物层 ($\text{TiC} + (\text{Ti}_3\text{Al} + \text{FeAl} + \text{FeAl}_2)$) 厚度对接头性能的影响如图 2-3-42 所示, 接头的抗拉强度随反应层厚度的增长呈山形变化, 在厚度为 $3\mu\text{m}$ 时强度最高, 并且所有断裂均发生在接头部位, 属脆性断裂。对 1223K 接合温度下、不同接合时间的断口分析可知, 在连接初期, 界面处局部的微观凸起优先接触而发生塑性变形, 由于有效接触面积较小, 界面接合强度低, 此时反应物还没有形成, 接头的强度主要由低强度的界面所决定。随着连接时间的增长, 界面处的塑性变形逐渐增大, 从而使有效接触面积增大, 接合率提高, 界面强度比较高, 同时 TiC 反应层也比较薄, 因而使接头达到了较高的连接强度, 断裂发生在 TiC 层和脱碳层的连接界面。当厚度超过 $3\mu\text{m}$ 以后, 反应进行得比较充分, 界面强度虽然很高, 但脆性反应层显著变厚而成为接头的薄弱部位, 再加上接头的应力分布变得更加复杂, 从而使接头强度降低。此时断裂发生在 TiC 层中。

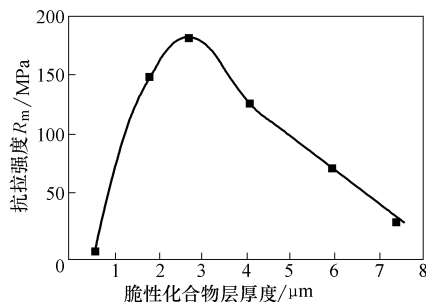


图 2-3-42 接头强度与反应层厚度的关系 ($T = 1223\text{K}$, $p = 20\text{MPa}$)

(2) TiAl 与 Ti 的扩散连接 在连接温度 $T = 1123\text{K}$ 及连接压力 $p = 5\text{MPa}$ 不变的条件下对 TiAl/Ti 进行扩散连接。在 $t = 0.9\text{ks}$ 时, Al、Ti 元素在界面处发生了相互扩散, 线分布曲线在界面处分别为平滑的升、降斜线, 说明在界面处出现了扩散固溶层, 并没有金属间化合物生成或生成的数量极小。随着连接时间的增长, 当 $t = 5.4\text{ks}$ 时, 界面反应层的厚度明显加宽, 从元素线分析可知, 在界面处形成了两个扩散区域。通过进行断口能谱及断口 X-衍射分析, TiAl 侧的反应区确定为金属间化合物 ($\text{Ti}_3\text{Al} + \text{TiAl}$) 层, Ti 侧的反应区为 Ti 和 Al 的固溶层。

图 2-3-43 为 $p = 20\text{MPa}$ 、 $t = 30\text{min}$ 时连接温度对接头抗拉强度及反应层厚度的影响, 其中抗拉强度的数值为每一个连接参数条件下五次拉伸试验的平均值。从图中可以看出, 虽然扩散连接温度的不同导致了界面上反应层厚度的不同, 但这些不同对扩散连接接头的抗拉强度值影响不大, 并且接头的最高抗拉强度值接近于 TiAl 母材的强度。

界面反应层厚度对接头强度也有一定的影响, 随着连接温度的提高, 接头的物理接触更加紧密, 原子的扩散程度加大, 在 TiAl/Ti 界面处形成 Ti_3Al 的数量不断增多, 导致 ($\text{Ti}_3\text{Al} + \text{TiAl}$) 双相层的增厚, 并由于生成相 Ti_3Al 的强度高于金属间化合物 TiAl, 且 ($\alpha_2 + \gamma$) 的双相组织的强度更高, 因此 ($\text{Ti}_3\text{Al} + \text{TiAl}$) 双相层的形成对提高 TiAl/Ti 接头强度有利, 并随着连接温度的提高, TiAl/Ti 接头的抗拉强度基本接近母材。

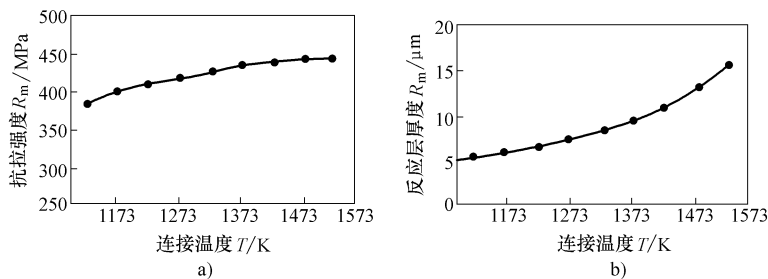


图 2-3-43 连接温度对 TiAl/Ti 接头抗拉强度及反应层厚度的影响

3.3.4 陶瓷材料的扩散连接

1. 陶瓷扩散连接的主要问题

(1) 界面存在很大的热应力 陶瓷与陶瓷、陶瓷与金属材料连接时, 由于陶瓷与金属线膨胀

系数差别很大,在扩散连接或使用过程中,加热和冷却时必然产生热应力,由于热应力的分布极不均匀,使接合界面产生应力集中,造成接头的承载性能下降。影响接头热应力的主要因素有材料因素(线膨胀系数、弹性模量、泊松比、孔隙率、屈服强度以及加工硬化系数等)、接头形状因素(板厚、板宽、长度、连接材料的层数、层排列顺序、接合面形状和接合面的粗糙度)和温度分布的影响(加热方式、加热温度、速度及冷却速度等)。

(2) 容易生成脆性化合物 由于陶瓷和金属的物理、化学性能差别很大,连接时除存在着键型转换以外,还容易发生各种化学反应,在界面生成各种碳化物、氮化物、硅化物、氧化物以及多元化合物。这些化合物硬度高、脆性大,是造成接头脆性断裂的主要原因。在陶瓷与金属的界面反应中,生成何种产物主要取决于陶瓷与金属(包括中间层)的种类。例如, SiC 与 Zr 的反应生成 ZrC 、 Zr_2Si 和三元化合物 $Zr_5Si_3C_x$; Si_3N_4 与 Ni-20Cr 合金反应生成 Cr_2N 、 CrN 和 Ni_5Si_2 , 但与 Fe、Ni 及 Fe-Ni 合金则不生成化合物; Al_2O_3 与 Ti 反应生成 TiO 和 $TiAl_x$; ZrO_2 与 Ni 的反应生成 NiO_{1-x} 、 Ni_5Zr 和 Ni_7Zr_2 。此外,生成化合物的类型也与连接温度和连接时间以及连接环境气氛有关。例如,在对 Si_3N_4 与 Ti 的高温反应研究中发现,当分别采用 N_2 和 Ar 作保护气氛时,即使采用相同的连接温度和连接时间,所得到的反应产物也不相同。

(3) 界面化合物很难进行定量分析 在确定界面化合物时,由于一些轻元素(C、N、B等)的定量分析误差较大,需制备多种标准试件进行标定。对于多元化合物的相结构确定,一般利用 X 射线衍射标准图谱进行对比,但一些新化合物相没有标准,给相的确定带来了很大困难。

(4) 缺少数值模拟的基本数据 由于陶瓷和金属钎焊及扩散连接时,界面容易出现多层化合物,这些化合物层很薄,对接头性能影响很大。在进行反应相成长规律、应力分布等计算模拟时,由于缺少这些相的数据,给模拟计算带来很大困难。

2. SiC 陶瓷的扩散连接

(1) 采用 Ti 中间层扩散连接 SiC 陶瓷 SiC 和中间层 Ti 在扩散连接时发生了化学反应,在反应的初期阶段,界面生成了 TiC 和 $Ti_5Si_3C_x$, 因 C 的扩散速度比较快, TiC 在 Ti 侧优先成长,而 $Ti_5Si_3C_x$ 则在 SiC 侧形成(见图 2-3-44)。在反应的中期阶段,由于 Si 和 C 元素在 SiC/ $Ti_5Si_3C_x$ 界面上聚集,形成了六方晶的 Ti_3SiC_2 相,界面层排列变为 $SiC/Ti_3SiC_2/Ti_5Si_3C_x + TiC/TiC/Ti$ 。进一步延长连接时间,反应进入后期阶段, Ti 全部参与反应并在界面上消失,由于两侧的 Si 和 C 的扩散, $Ti_5Si_3C_x + Ti$ 混合相也全部消失, Ti_3SiC_2 层中及 $Ti_3SiC_2/Ti_5Si_3C_x$ 界面形成了斜方晶体的 $TiSi_2$ 化合物。由 Ti-Si-C 三元相图可知,达到相平衡时界面呈现出 Ti_3SiC_2 和 $TiSi_2$ 组成的混合组织。

图 2-3-45 是 SiC/Ti 界面的反应生成物随连接时间与温度的关系曲线。从低温侧开始的第一条线是单相 $Ti_5Si_3C_x$ 的产生曲线,在该线以下的区,界面反应产物是 TiC 和 $Ti_5Si_3C_x$, 形成块状的 TiC 和 $TiC + Ti_5Si_3C_x$ 的混合组织,达到该线所需的连接温度及时间时形成层状的 $Ti_5Si_3C_x$ 。随着温度升高或连接时间的延长,界面出现了 Ti_3SiC_2 相,此时 SiC 和 Ti 界面反应的扩散路径完全形成,如前所述,界面结构呈现为 $SiC/Ti_3SiC_2/Ti_5Si_3C_x/Ti_5Si_3C_x + TiC/TiC + Ti/Ti$ 。进一步增加连接温度或延长时间,比较稳定的硅化物 $TiSi_2$ 在界面出现。该图给出了各反应物形成的条件(连接温度及时间),其作用是根据连接条件可以预测界面产生化合物的种类,也可以根据想要获得的化合物种类确定连接条件。

具有各种界面的接头拉剪试验结果如图 2-3-46 所示,接头强度在 1373K 时约为 44MPa,到 1474K 时上升到 153MPa。从 1473K 开始再升高温度到 1573K,接头强度反而下降到 54MPa。连接温度进一步提高,接头强度又开始上升,到 1773K 时达到了 250MPa 的最大值。从断裂发生的部位可知,1473K 以下的温度区间,断裂发生在 $SiC/Ti_5Si_3C_x + TiC$ 的界面上。温度为 1573K 的接头,断裂虽然也发生在界面,但横穿反应层向另一侧发展。1673K 以上的接头,断裂发生在靠近接合层的 SiC 母材上,并在 SiC 内沿接合面方向发展。从断面组织分析可知,1373K 的断面非常平坦;1473K

的断面凹凸较多, SiC 断面上粘有较多的块状反应相 $Ti_5Si_3C_x + TiC$ 。所有 Ti 的化合物中 TiC 最硬, 而且 TiC 和 SiC 的线膨胀系数之差最小, 两者在结晶学上也有很好的对应关系, 故可推测出 SiC/TiC 的界面强度高。但在 1473K 的界面上, TiC 和 SiC 直接接触的面积比较少, 难以使接头强度提高。温度为 1573K 的界面, SiC 和 $Ti_5Si_3C_x$ 单相层直接相连, SiC/TiC 的界面全部消失, 再加上 $Ti_5Si_3C_x$ 相本身强度不高, 和 SiC 的线膨胀系数之差也变大, 从而使接头强度大大下降。获得最大强度的 (1773K) 界面上, SiC 和 Ti_3SiC_2 直接相连, 两者也有很好的结晶对应关系, 虽然脆性相 $TiSi_2$ 存在, 但弥散分布于 Ti_3SiC_2 中, 故接头表现出高的接合强度。

选取 1773K、3.36ks 的最佳连接条件进行接合, 测量接头的高温抗剪强度。如图 2-3-47 所示, 接头的高温强度可保持到 1000K 左右, 其强度值比室温稍高, 显示出好的耐高温特性。破断位置和室温时相同, 也是发生在接头附近的 SiC 母材上。

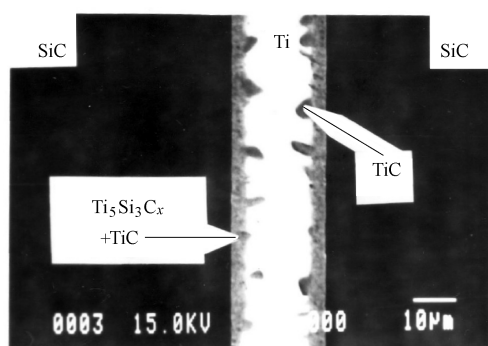


图 2-3-44 SiC/Ti/SiC 接头组织

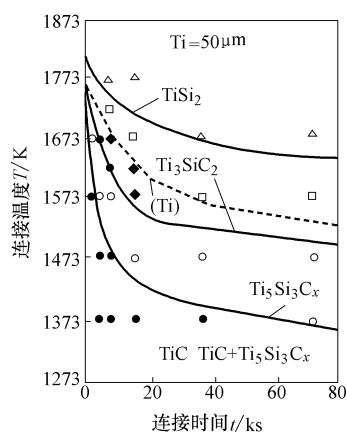


图 2-3-45 反应生成物随温度和时间变化

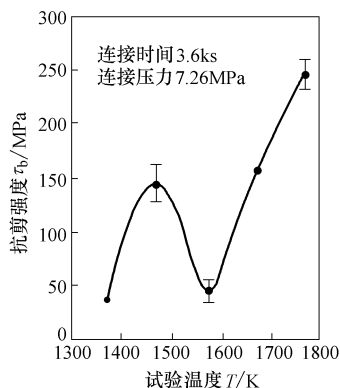


图 2-3-46 连接温度对抗剪强度的影响

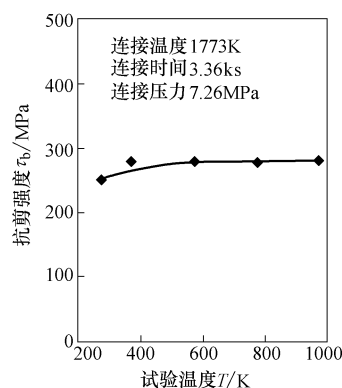


图 2-3-47 SiC/Ti/SiC 接头的高温强度

(2) 采用 Nb 中间层扩散连接 SiC 陶瓷 在 1116K、30min 的扩散连接条件下, SiC 和 Nb 的界面发生了相互扩散, 可以观察到不连续的反应区。在 1790K、14.4ks 的连接条件下, 界面反应物明显地分为 2 层, SiC 侧的反应层比较厚, 界面整齐, 元素成分分析和 X 射线衍射结果证明是 $Nb_5Si_3C_x$ ($0 < x \leq 1$) 三元化合物, 而靠近 Nb 侧的反应层厚度不均匀, 是六方晶的 Nb_2C 。当长时间进行扩散连接时, Nb 在界面上消失, 由于 C 从外部向内扩散, Nb_2C 全部变成了 NbC, 同时在 Si 的富集区形成了 $NbSi_2$ 相, 随着 NbC 和 $NbSi_2$ 两相的成长, $Nb_5Si_3C_x$ 相也逐渐消失, 界面化合物只剩下 $NbSi_2$ 和 TiC 相。

图 2-3-48 是接合时间和接头室温拉剪强度的关系曲线。短间接合的试件，接头强度不高，主要原因是界面反应不充分，有效接合面积少。在 7.2 ~ 36ks 范围内，接头的抗剪强度随连接时间的增加而上升，在 36ks 时达到了 187MPa 的最高值。再增加连接时间，接头强度反而下降，108ks 时的接合强度只有 87MPa。对断裂位置进行观察发现，36ks 以下的短间接合的试件，破断从 SiC 和反应层的界面发生，在扩张过程中横穿整个反应层后，又沿另一侧的 SiC/反应层界面扩展。接合时间为 36ks 时的接头，断在靠近接合界面的 SiC 母材中，而 108ks 时的接头，断裂在反应层内部。

(3) SiC 和 TiAl 的扩散连接 在连接温度 $T = 1573\text{K}$ 、连接时间 $t = 1.8\text{ks}$ 的条件下，连接压力对 SiC/TiAl 接头室温抗剪强度的影响如图 2-3-49 所示。由图可见，当连接压力较小时，接头强度较低。随着连接压力的增大，接头强度逐渐提高。当连接压力达到 $p = 25\text{MPa}$ 时，接头强度达到最大值。而后再增加连接压力，接头强度维持不变。接头强度随连接压力产生这种变化的实质是由连接表面的紧密接触程度及反应状况决定的。当连接压力较小时，由于 SiC 和 TiAl 合金难于变形而使待连接表面只有较少部分能够达到紧密接触并通过界面反应实现局部连接，因而接头强度较低。随着连接压力的增大，表面紧密接触面积增加，即接头有效接合面积增加，因而接头强度提高。当连接压力增加到一定值时，待连接表面已完全达到紧密接触，形成了反应层，有效接合面积也达到极限，接头强度也达到最大值。而后再增加连接压力，界面反应层向厚度变厚，接头强度也基本不变。在连接温度为 1573K 时，连接压力值可选 25 ~ 30MPa。

在连接温度 $T = 1573\text{K}$ 、连接压力 $p = 30\text{MPa}$ 的条件下，当连接时间小于 0.9ks 时，接头强度随连接时间的增加急剧增加，并在连接时间 $t = 0.9\text{ks}$ 时迅速达到 240MPa 的最大值。当连接时间大于 0.9ks 时，接头强度又随连接时间的增加而降低，而且开始时下降速度较快，而后趋缓。

3. Al_2O_3 陶瓷与金属的扩散连接

(1) 采用金属中间层扩散连接 Al_2O_3 陶瓷 扩散连接 Al_2O_3 陶瓷时，多采用金属中间层进行连接，常用的中间层有 Al、钢、Ti、Ni 和 Cu，表 2-3-6 给出了连接条件和接头的抗拉强度。

表 2-3-6 Al_2O_3 陶瓷的扩散连接条件及接头的抗拉强度

中间层材料	连接温度/℃	连接压力/MPa	抗拉强度/MPa
Al	400	200	< 1.0
Al	450	200	< 0.15
Al	550	20	19
Al	630	10	65
Al	700	50	20(熔化)
Al	600	20	87
Al	600	20	104

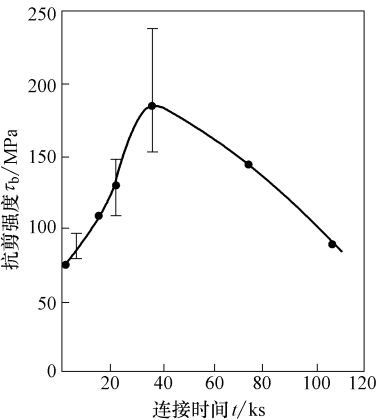


图 2-3-48 连接时间对 SiC/Nb/SiC 接头抗剪强度的影响

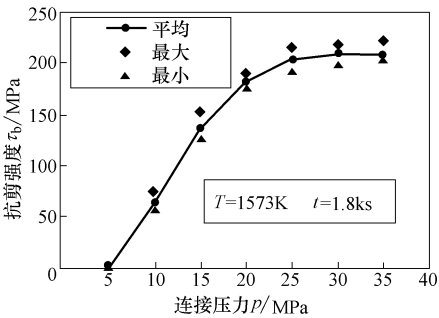


图 2-3-49 连接压力对 SiC/TiAl 接头抗剪强度的影响

(续)

中间层材料	连接温度/℃	连接压力/MPa	抗拉强度/MPa
Ti	1000	200	2.0
Ti	1250	200	>65
钢	750	200	1.0
钢	800	400	1.0
钢	1100	50	40
钢	1300	10	52
钢	1300	50	105
钢	1300	50	150
钢	1300	50	150

(2) Al_2O_3 陶瓷与 Al 的扩散连接 在电子行业中，需要将电子元器件的陶瓷基板 Al 散热器连在一起，由于 Al_2O_3 陶瓷和 Al 的熔点相差太大，因此采用共晶烧结 Cu 工艺将 Al_2O_3 陶瓷表面预先金属化，然后进行扩散连接。

图 2-3-50 为 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}/\text{Al}$ 扩散连接接头强度与连接时间的关系，当 $t = 15\text{min}$ 时，抗拉强度达到了最大值，而抗剪强度仍在一定的时间范围内处于上升的趋势。这是由于在 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}/\text{Al}$ 扩散连接工艺中，Al/Cu 界面处材料间发生相互扩散后，在界面处形成了金属间化合物，当金属间化合物以颗粒状分布于界面时，将增加界面的抗剪强度，但降低了界面抗拉强度。随着连接时间的增长，金属间化合物不断地长大，当化合物由颗粒状逐渐转变为片状时，接头的抗剪强度和抗拉强度均大幅下降。从图中可看出，当连接时间 $t \geq 25\text{min}$ 后，接头抗拉强度与剪强度均明显下降，这说明在 $t = 25\text{min}$ 时金属间化合物已由粒状变为片状，金属间化合物对强度的负影响作用显著增高。

图 2-3-51 为连接温度对接头强度的影响，在 763K 时接头获得最大抗拉强度 114MPa，在 788K 时获得最大抗剪强度 47MPa，可见获得最大抗剪强度值的温度滞后于获得最大抗拉强度的温度。

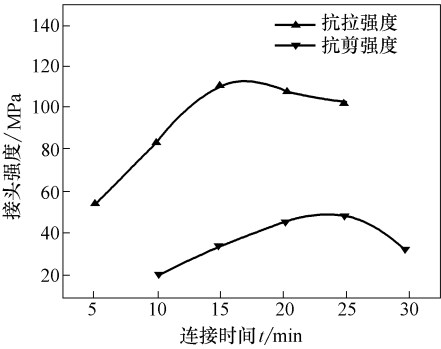


图 2-3-50 连接时间对接头强度的影响 ($T = 773\text{K}$)

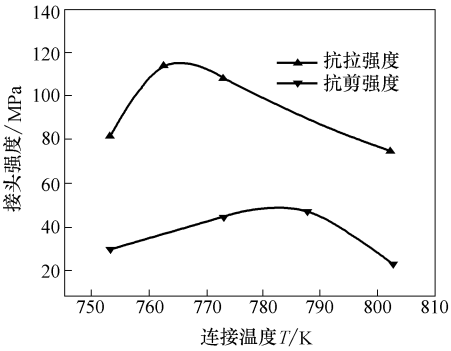


图 2-3-51 连接温度对接头强度的影响 ($t = 1226\text{s}$)

(3) Al_2O_3 陶瓷和 Pt 的连接 Al_2O_3 陶瓷和 Pt 直接连接时，除了连接温度对接头性能有影响以外，连接压力的影响如图 2-3-52 所示。从图中可知，随着压力的增加，接头的抗弯强度逐渐增加，当压力达到 7MPa 时，接头强度约为 200MPa，再增加压力，接头强度基本不再增加。这说明压力较小时，增加压力有利于增加界面的物理接触，可以促进扩散的进行。

4. Si_3N_4 陶瓷与金属的扩散连接

(1) 接头的界面反应相 Si_3N_4 陶瓷和金属连接时，界面发生化学反应，生成各种反应相。研

究表明,氮化物陶瓷与金属扩散连接时,采用真空(或Ar气保护)和N₂气保护所得到的界面反应产物不同,例如,在N₂气保护下Si₃N₄和Nb反应时,界面没有硅化物生成,只生成了氮化物,通过质量测定分析发现,混合物的质量不随温度和反应时间变化,说明没有N₂逸出。在Ar气下进行的反应不仅生成了氮化物,同时也出现了Nb₅Si₃和NbSi₂硅化物。常用金属和Si₃N₄陶瓷的反应产物见表2-3-7,反应产物或界面结构均是在夹层没有耗尽的情况下得到的。

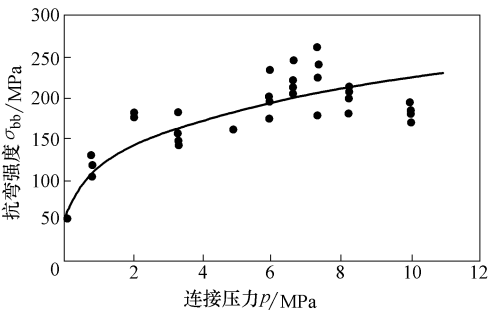


图 2-3-52 Al₂O₃-Pt 扩散连接时压力
对接头抗弯强度的影响

表 2-3-7 Si₃N₄ 陶瓷与金属连接接头的反应产物

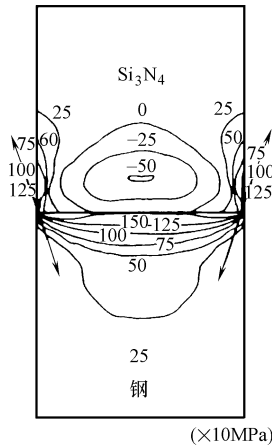
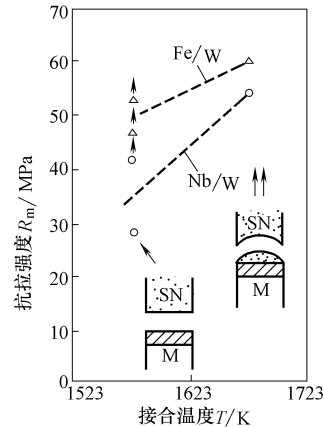
连接材料	温度/K	时间/ks	压力/MPa	保护气氛	反应产物
Si ₃ N ₄ /Incoloy909	1200	14.4	200	Ar	TiN, Ni ₁₆ Nb ₆ Si ₇
Si ₃ N ₄ /Ni-20Cr/Si ₃ N ₄	1473	3.6	50	真空	CrN, Cr ₂ N, Ni ₅ Si ₂
Si ₃ N ₄ /Ti	1073	7.2	0	N ₂	TiN + Ti ₂ N
Si ₃ N ₄ /Ti	1323	7.2	0	Ar	TiN + Ti ₂ N + Ti ₅ Si ₃
Si ₃ N ₄ /Mo	1473	3.6	0	N ₂	Mo ₃ Si, Mo ₅ Si ₃
Si ₃ N ₄ /Mo	1473	3.6	0	Ar	Mo ₃ Si, Mo ₅ Si ₃ , MoSi ₂
Si ₃ N ₄ /Cr	1473	3.6	0	—	CrN, Cr ₂ N, Cr ₃ Si
Si ₃ N ₄ /Nb	1473	3.6	0	N ₂	NbN, Nb ₄ N ₃ , Nb _{4.62} N _{2.14}
Si ₃ N ₄ /Nb	1473	3.6	0	Ar	Nb ₅ Si ₃ , NbSi ₂ , Nb ₂ N, Nb _{4.62} N _{2.14}
Si ₃ N ₄ /V/Mo	1523	5.4	20	低真空	V ₃ Si, V ₅ Si ₃
Si ₃ N ₄ /AISI316	1273	86.4	7	真空	α-Fe 固溶体, γ-Fe 固溶体
Si ₃ N ₄ /Ni-Cr	1073 ~ 1473	5 ~ 70	0	Ar	Ni ₂ Si, Ni ₃ Si ₂ , Cr ₃ Si, Cr ₅ Si ₃ , (Cr, Si) ₃ Ni ₂ Si
Si ₃ N ₄ /Ni + Nb + Fe-36Ni/MA6000	1473	3.6	100	—	NbN, Ni ₈ Nb ₆ , Ni ₆ Nb ₇ , Ni ₃ Nb

(2) 接头强度 对于直接扩散连接的圆柱状Si₃N₄/S45C(45钢)接头,利用弹性有限元法进行了应力分布计算,当接头从1273K冷却到室温时,计算结果如图2-3-53所示。在接合界面附近的Si₃N₄母材侧,拉应力值最大,其方向几乎与界面垂直,在拉伸试验和弯曲试验时,该应力与载荷叠加,使接头的强度下降。

为了降低接头的热应力和提高接头强度,常采用多层中间层(也称复合中间层)进行扩散连接。图2-3-54是采用Fe/W和Nb/W中间层连接时的接头强度(图中SN为陶瓷,M为金属),扩散连接温度范围为1473~1673K,压力为100MPa,扩散连接时间为30min。从图中可知,在相同的扩散连接参数下,采用Fe/W中间层可以获得比较高的抗拉强度。表2-3-8给出了Si₃N₄陶瓷与金属的扩散连接参数及接头强度。

表 2-3-8 Si₃N₄ 陶瓷与金属的扩散连接参数及接头强度

母材与中间层组配	夹层厚度 /μm	界面尺寸 /mm	连接温度 /K	连接时间 /ks	连接压力 /MPa	真空度 /Pa	强度 /MPa	评定 方法
Si ₃ N ₄ /Ni-20Cr/Si ₃ N ₄	125	15×15	1473	3.6	100	1.4×10 ⁻⁴	100	弯曲
Si ₃ N ₄ /Ni-20Cr/Si ₃ N ₄	125	15×15	1423	3.6	100	Ar 保护	300	弯曲
Si ₃ N ₄ /V/Mo	25	Φ10	1328	5.4	20	5×10 ⁻³	118	剪切
Si ₃ N ₄ /Invar/AISI316	250	Φ10	1323	5.4	7	2×10 ⁻³	95	剪切
Si ₃ N ₄ /AISI316	—	Φ10	1373	10.8	7	1×10 ⁻³	37	剪切
Si ₃ N ₄ /Fe-36Ni + Ni/MA6000	2000 + 1000	3.5×2.5	1473	7.2	100	—	75	弯曲
Si ₃ N ₄ /Ni	—	Φ10	1273	3.6	5	6.7×10 ⁻³	32	拉伸
Si ₃ N ₄ /Ni-Cr/Si ₃ N ₄	200	15×15	1423	3.6	22	Ar 保护	160	弯曲
Si ₃ N ₄ /Ni + Ni-Cr + Ni + Ni-Cr + Ni/Si ₃ N ₄	10 + 60 + 60 + 60 + 10	15×15	1423	3.6	22	Ar 保护	391	弯曲
Si ₃ N ₄ /Cu-Ti-B + Mo + Ni/40Cr	50 + 100 + 1000	Φ14	1173	2.4	30	6×10 ⁻³	180	剪切

图 2-3-53 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{S45C}$ 钢界面应力分布图 2-3-54 Si_3N_4 陶瓷与钢接头强度
(采用 Fe/W、Nb/W 中间层连接)

3.3.5 复合材料的扩散连接

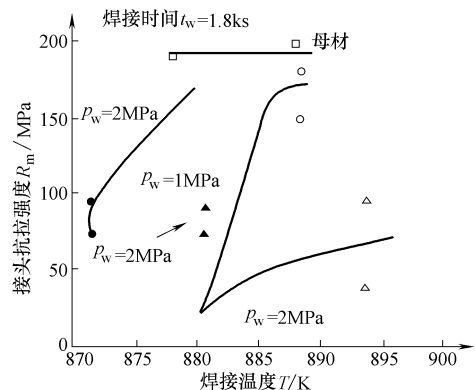
复合材料具有比强度高、比模量高、耐疲劳性能好、热膨胀系数小、高温性能好和良好的耐磨、减振等性能，在航空航天、汽车、交通、机械、化工、船舶等领域有广阔的应用前景。例如复合材料代替 2024 铝合金制造战斗机机身下垂尾，刚度增加 50%，寿命提高约 17 倍，用于导弹发动机的制造，使部件的重量减轻 40%、燃料消耗降低 30%~50%。利用复合材料制造的人造卫星，不仅减重 40%~75%，而且使有效载荷的在轨振动减轻 90%，提高了控制精度和照片的拍摄、传输精度，从而提高了卫星的整体性能。

1. 金属基复合材料的扩散连接

金属基复合材料扩散连接时在接触面上将出现基体-基体、基体-增强相、增强相-增强相三种微接触形式，其中基体与基体之间较容易实现结合，基体与增强相之间较难实现连接，而增强相与增强相之间几乎不可能实现扩散结合。同时，材料表面有一层致密的氧化膜，用机械或化学方法清理后，它又立刻生成，因此控制接合界面氧化膜的行为及增强相的接触状态，是复合材料扩散连接的难点。

Al_2O_3 短纤维增强 6063 铝基复合材料固相扩散连接时，表面应进行电解处理，使增强相纤维凸出基体表面，在连接过程中使纤维插入另一侧母材中，可显著提高接头强度。铝基复合材料对扩散连接的参数非常敏感，在一定范围内，可得到最佳的接头强度，此时当连接温度变化 10K 或连接压力变化 1MPa 时，都会引起接头强度的明显变化，如图 2-3-55 所示，图中 p_w 表示扩散连接压力。

采用与母材形成低熔点共晶物的 Cu、Ag 作为中间夹层，在扩散连接时界面出现液相共晶物，并可获得高强度接头（见表 2-3-9）。通过组织观察发现，采用铝合金作为中间层时，接头区域不可避免地出现无纤维强化层，以 Cu、Ag 作为中间夹层时，在接合

图 2-3-55 温度对 $\text{Al}_2\text{O}_3/6063$
扩散连接接头强度的影响

面处发现大量的折断纤维。

扩散连接 SiC 晶须增强铝基复合材料 SiCw/6061Al（18% ~ 20% 体积分数）时，其工艺规程为：用 280#砂纸表面打磨、真空度 0.1Pa、连接温度 600℃、连接压力 4MPa、保温时间 30min。直接或以 Al 作为中间夹层进行扩散连接时，接头强度为 270MPa，接近母材强度；而以 Cu 作为中间夹层时得到的接头强度仅为 50 ~ 60MPa。

表 2-3-9 中间层金属对接头抗拉强度与断裂位置的影响

中间层材料及厚度	连接温度 /K	连接压力 /MPa	抗拉强度 /MPa	断裂位置
无中间层	873	2	98, 97	连接界面
2017/75μm	883	1	161	连接界面
	873	2	184	母材
		1	173	连接界面
	873	2	187	连接界面
2017/30μm	883	1	177	连接界面
	873	2	187	连接界面
Ag/16μm	873	2	188, 145	连接界面
Cu/15μm	883	1	125	连接界面
	873	2	179, 181	母材, 连接界面
		1	162	连接界面
	823	1	119	连接界面

采用 Al-Cu-Mg 系合金作中间层对 SiC 纤维增强铝基复合材料与纯 Al 进行扩散连接，当中间层液相体积分数为 1% ~ 5% 时，接头强度较为稳定，但微观组织分析表明，此时也只是复合材料基体与铝合金中间层结合良好，而 SiC 纤维与中间层铝合金未获得良好结合，此时接头强度低于母材强度，如图 2-3-56 所示。

试验表明，在铝基复合材料液、固相温度区间存在一个“临界温度区域”，在该温度区域内扩散连接时，接合界面形成液相，接头强度可显著提高（见图 2-3-57）。采用透射电镜对比分析铝基复合材料母材以及扩散连接接头区域基体与增强相的界面状态时可知，基体与增强相的界面出现微量界面反应物，但未明显改变增强相形貌。

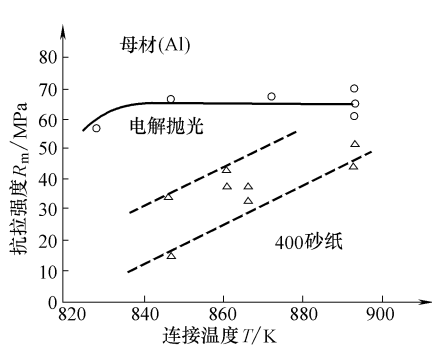


图 2-3-56 扩散连接 SiC/Al-Al 合金扩散连接接头的强度（2017 中间夹层）

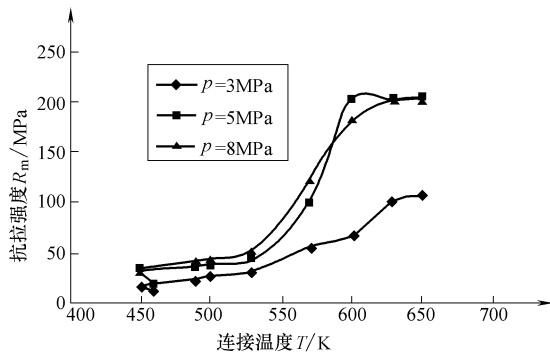


图 2-3-57 连接温度对铝基复合材料接头抗拉强度的影响

2. SiC 纤维增强 TiAl 基复合材料的扩散连接

图 2-3-58 是压力 98MPa、保温时间 14.4ks 条件下 SiC 纤维和 TiAl（质量分数 Ti-45Al-5Cr）接头组织随连接温度的变化情况。从图可知，950℃ 温度下的界面，由于 TiAl 的变形小，SiC 纤维周

围存在空隙, 接合不好。温度上升到 1000°C 时, 接合界面的空隙全部消失, 几乎观察不到界面的反应层。增加温度到 1050°C , 由于反应更加充分, SiC 纤维周围出现了环状的反应层, 但 TiAl 母材组织没有变化。进一步增加温度到 1100°C , 过度的界面反应使反应层发生了变化, 出现了黑色块状的新反应相。从接头的室温抗拉强度可知, 温度为 1000°C 时达到 630MPa 的最大值, 温度为 1100°C 时, 由于过度的反应, 接头的抗拉强度下降到 300MPa 以下。

对于含 SiC 纤维体积分数 22% 的 SiC/TiAl 复合材料, 进行了比强度分析试验, 结果如图 2-3-59 所示, 在试验温度 700°C 时, TiAl 的比强度和 Ni 基合金的比强度相同, 但 SiC/TiAl 材料的比强度提高了 1.3 倍。

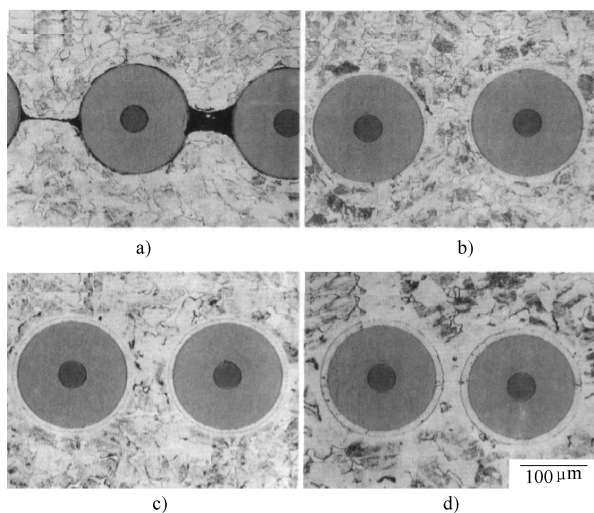


图 2-3-58 SiC/TiAl 组织随温度的变化
a) 950°C b) 1000°C c) 1050°C d) 1100°C

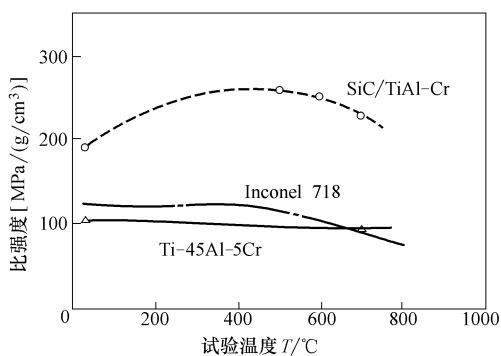


图 2-3-59 SiC/TiAl 的试验温度和比强度的关系

3. C/C 复合材料的连接

C/C 复合材料一般采用加中间层的办法进行扩散连接, 中间层材料可以采用石墨、B、Ti 或 TiSi_2 等。不管采用哪种方法, 都是通过中间层与 C 的反应, 形成化合物或晶体而达到连接的目的。

用 B 或 B + C 中间层扩散连接 C/C 复合材料时, B 与 C 在高温下发生化学反应, 形成硼的碳化物。图 2-3-60 是接头抗剪强度与连接温度的关系。所用试件的尺寸为 $25.4\text{mm} \times 12.7\text{mm} \times 6.3\text{mm}$, 三维纤维增强。由图中可知, 扩散连接温度低于 2095°C 时, B 中间层的接头强度比 B + C 中间层的强度高, 而温度超过 2095°C 以后, 由于 B 的蒸发损失, 使接头强度急剧下降。扩散连接压力对接头抗剪强度有很大影响, 在 1995°C 连接温度下, 扩散连接压力由 3.1MPa 增加到 7.38MPa 时, 接头在 1575°C 的抗拉强度由 6.9MPa 增加到 9.7MPa 。

用 TiSi_2 作中间层扩散连接 C/C 复合材料时, 接头中出现了液相, 具有固相扩散和液相扩散连接的特点。连接时, 将纯度为 99.4% (质量分数) 的 TiSi_2 粉放在试件中间, 试件尺寸仍然为 $25.4\text{mm} \times 12.7\text{mm} \times 6.3\text{mm}$ 。采用变温度的方法进行扩散连接, 先在 0.69MPa 压力下升温到 1310°C , 然后去掉压力升温到 1490°C , 在该温度下保温时间为 $2 \sim 15\text{min}$ 。图 2-3-61 是试验温度对上述接头抗剪强度的影响, 从图中可知, 在 $1100 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ 的试验温度下接头具有较高的强度, 其最大值可达 40MPa 以上。

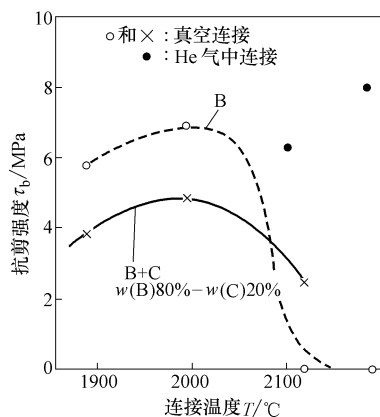


图 2-3-60 连接温度对 C/C 复合材料接头抗剪强度的影响 (B、B + C 中间层)

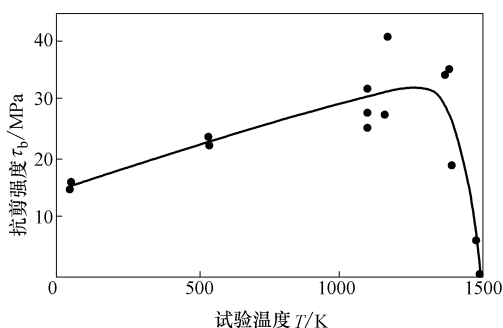


图 2-3-61 连接温度对 C/C 复合材料接头抗剪强度的影响 (TiSi₂ 中间层)

3.4 扩散连接设备

3.4.1 扩散连接设备的分类

1. 按照真空度分类

根据工作空间所能达到的真空度或极限真空度，可以把扩散连接设备分为 4 类，分别为低真空（0.1 Pa 以上）焊机、中真空（0.1 Pa ~ 10⁻³ Pa）焊机、高真空（< 10⁻⁵ Pa）焊机和低压或高压保护气体扩散焊机。根据连接工件在真空中所处的情况，可分为焊件全部处在真空中的焊机和部分或局部真空焊机。局部真空扩散焊机仅对焊接区域进行保护，主要用来连接大型工件（如轴、管等）。

2. 按照热源类型和加热方式分类

进行扩散连接时，加热热源的选择取决于连接温度、工件的结构形状及大小。根据扩散连接时所应用的加热热源和加热方式，可以把焊机分为感应加热、辐射加热、接触加热、电子束加热、辉光放电加热、激光加热、光束加热等。实际中应用最广的是高频感应加热和电阻辐射加热两种方式。

3. 其他分类方法

根据真空室的数量，可以将扩散连接设备分为单室和多室两大类；根据真空连接的工位数（传力杆的数量），又可分为单工位和多工位焊机。根据自动化程度，可分为手动、半自动和自动控制 3 类。

3.4.2 扩散连接设备的组成

不论何种加热类型的扩散连接设备，均由以下全部或其中的几部分组成。

1. 真空系统

真空系统包括真空室、机械泵、扩散泵、管路、切换阀门和真空计。真空室的大小应根据焊接工件的尺寸确定，对于确定的机械泵和扩散泵，真空室越大，抽到 10⁻³ Pa 所需的时间就越长。一般情况下，机械泵能达到的真空度为 10⁻¹ Pa，扩散泵可以达到 10⁻³ ~ 10⁻⁵ Pa 真空度。为了缩短抽真空的时间，一般还要在机械泵和扩散泵之间增加一级增压泵（也称罗斯泵）。

2. 加热系统

高频感应扩散焊接设备采用高频电源加热，工作频率为 60 ~ 500kHz，由于趋肤效应的作用，该类频率区间的设备只能加热较小的工件。对于较大或较厚的工件，为了缩短感应加热时间，最好选用 500 ~ 1000Hz 的低频焊接设备。感应线圈由铜管制成，内通冷却水，其形状可根据焊件的形状进行设计，但一般为环状，线圈可选用 1 匝或多匝。在焊接非导电的陶瓷等材料时，应采用间接加热的方法，可在工件和感应线圈之间加圆筒状石墨导体，利用石墨导体产生的热量进行焊接加热。

电阻加热真空扩散连接设备采用辐射加热的方法进行连接，加热体可选用钨、钼或石墨材料。真空室中应有耐高温材料（一般用多层钼箔）围成的均匀加热区，以便保持温度均匀。

3. 加压系统

为了使被连接件之间达到密切接触，扩散连接时要施加一定的压力。对于一般的金属材料，在合适的扩散连接温度下，采用的压力范围为 1 ~ 100MPa。对于陶瓷、高温合金等难变形的材料，或加工表面粗糙度较大，或当扩散连接温度较低时，才采用较高的压力。扩散连接设备一般采用液压或机械加压系统，在自动控制压力的扩散连接设备上，一般装有压力传感器，以此实现对压力的测量和控制。

4. 控制系统

控制系统主要实现温度、压力、真空度及连接时间的控制，少数设备还可以实现位移测量及控制。温度测量采用镍铬-镍铝、钨-铼、铂-铂铑等热电偶，测量范围为 293 ~ 2573K，控制精度范围为 $\pm(5 \sim 10)$ K。采用压力传感器测量施加的压力，并通过和给定压力比较进行调节。控制系统多采用计算机编程自动控制，可以实现连接参数显示、存储、打印等功能。

5. 冷却系统

为了防止设备在高温下损坏，对扩散泵、感应加热线圈、电阻加热电极、辐射加热的炉体等应按要求通水冷却。

3.4.3 典型扩散连接设备及其工作原理

1. 电阻辐射加热真空扩散连接设备

真空扩散焊机是最常用的扩散连接设备，结构原理如图 2-3-62 所示。真空室内的加压系统一般采用液压，对小型焊机也可用机械加压方式。加压系统应保证压力均匀可调且可靠性高。表 2-3-10 是 Workhorse II 型和 Centorr6—1650—15T 型真空扩散连接设备的主要性能指标。该类设备的主要特点是采用 Leybold 系列 D40B 真空机械泵的全自动真空系统；加热、加压和冷却采用 Honeywell DCP—550 仪表数字程序控制，包括 99 级程序，能自动调节，有计算机接口；由 Honeywell UDC—2000 数字指示仪控制过热温度指示；由 Honeywell UDC—3000 控制柱塞行程，并进行数字显示。

2. 感应加热扩散连接设备

图 2-3-63 是感应加热扩散焊机示意图，由高频电源和感应线圈构成加热系统，机械泵、扩散泵和真空室构成真空系统。对于非导电材料如陶瓷等，可以采用高频加热石墨等导体，然后把工件放在石墨管中进行间接辐射加热。如图 2-3-64 所示为感应加热扩散连接设备。

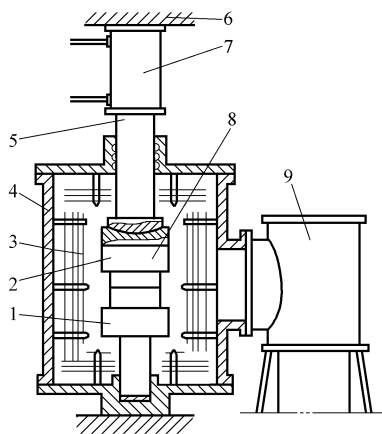


图 2-3-62 电阻辐射加热真空扩散连接设备结构原理示意图

- 1—下压头 2—上压头 3—加热器
4—真空炉体 5—传力杆 6—机架
7—液压系统 8—工件 9—真空系统

表 2-3-10 真空扩散连接设备的主要性能指标

型 号	主要性能指标						
	极限真空度 /Pa	最高温 度/℃	最大压 力/tf	炉膛尺寸 /mm	加热功率 /kVA	工作电 压/V	保护气体
3033—1350—30T ^①	5×10^{-4}	1350	30	304 × 304 × 457	45	380	N ₂ , Ar, 真空
6—1650—15T	5×10^{-4}	1650	15	200 × 300 × 450	75	380	N ₂ , Ar, 真空

① 1tf = 9.8 × 10³ N。

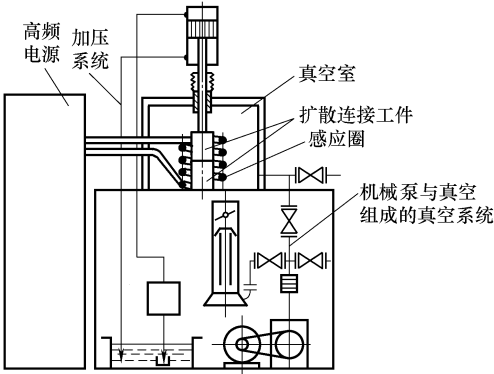


图 2-3-63 感应加热
扩散焊机原理示意图



图 2-3-64 感应加热扩散连接设备

3. 超塑成形-扩散连接设备

此类设备是由压力机和专用加热炉组成，可分为两大类。一种是由普通液压机与专门设计的加热平台构成。加热平台由陶瓷耐火材料制成，安装于压力机的金属台面上。超塑成形-扩散用模具及工件置于两陶瓷平台之间，可以将待连接零件密封在真空容器内进行加热。另一种是压力机的平台置于加热炉内，如图 2-3-65 所示，其平台由耐高温的合金制成，为加速升温，平台内也可安装加热元件。这种设备有一套抽真空供气系统，用单台机械泵抽真空，利用反复抽真空-充氩方式降低待焊表面及周围气氛中的氧分压。高压氩气经气体调压阀，向装有工件的模腔内或袋式毛坯内供气，以获得均匀可调的扩散连接压力和超塑成形压力。

4. 热等静压扩散焊设备

近年来，为了制备致密性高的陶瓷及精密形状的构件，热等静压（简称 HIP）设备受到人们的重视。在加高温的同时，对工件施加很高的压力，以增加致密性或获得所需的构件形状。一般采用全方位加压，压力最高可达 2000 个大气压。该设备可用于粉末冶金、铸件缺陷的愈合、复合材料制备、陶瓷烧结及精密复杂构件的扩散连接等。图 2-3-66 为 HIP—1605 型热等静压扩散焊设备。

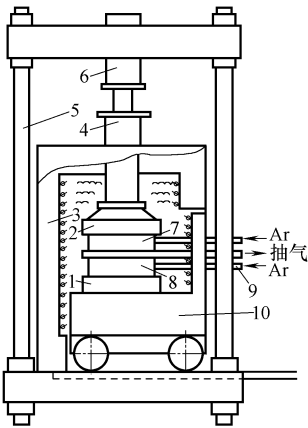


图 2-3-65 超塑成形-扩散连接设备示意图

- 1—下金属平台 2—上金属平台 3—炉壳
- 4—导筒 5—立柱 6—液压缸 7—上模具
- 8—下模具 9—气管 10—活动炉底

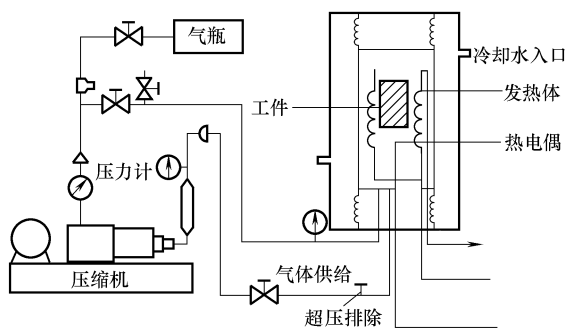


图 2-3-66 HIP—1605 型热等静压扩散焊设备示意图

参 考 文 献

- [1] 赵熹华, 冯吉才. 压焊方法及设备 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册: 第1卷 焊接方法及设备 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [3] 中国机械工程学会, 中国材料研究学会. 中国材料工程大典: 第22卷 材料焊接工程(上) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [4] 冯吉才. 固相接合されたSiCセラミックスと金属Ti, Cr, Nb, Ta接合体におけるるる界面反応机理に関する研究 [D]. 大阪: 日本国大阪大学, 1996. 15-54.
- [5] 何鹏. TiAl与40Cr钢复合阻隔法扩散连接机理及工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001. 45-77.
- [6] 刘会杰. SiC陶瓷与TiAl合金的扩散连接机理及反应层成长行为研究. [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002. 44-60.
- [7] 瀬戸佐智生, 松本浩司, 増山智将, 等. TiAl金属间化合物と构造用钢の扩散接合部の强度特性. 溶接学会论文集. 1998, 16(1): 59-65.
- [8] Munz D, Skuhr M A, and Yang Y Y. Thermal Stresses in Ceramic-Metal Joints with an Interlayer [J]. Journal of the American Ceramic Society. 1995, 78(2): 285-290.
- [9] 下尾聡夫, 岡村清人. Si₃N₄粉末と金属との反応 [J]. 高温学会誌. 1996, 22(1): 8-19.
- [10] Naka M, Feng J C and Schuster J C. Phase Reaction and Diffusion Path of the SiC/Ti System [J]. Metallurgical and Materials Transactions. 1997, 28A: 1385-1390.
- [11] Suganuma Katsuaki, Okamoto Taira, Mitsue Koizumi and Masahiko Shimada. Effect of thickness on direct bonding of silicon nitride to steel [J]. Am. Ceram. Soc., 1985, 68(12): c334-c335.

第 4 章 摩 擦 焊

摩擦焊是利用焊件与焊件或搅拌头与焊件相对摩擦运动产生的热量来实现材料可靠连接的一种压焊方法，其焊接过程是在压力的作用下，相对运动的待焊接材料之间产生摩擦，使界面及其附近温度升高并达到热塑性状态，氧化膜及其污染层破碎、净化，材料发生塑性变形与流动，通过界面元素扩散及再结晶冶金反应而形成接头。由于摩擦焊接头是在被焊金属熔点以下形成的，所以属于固态焊接方法。

本章在介绍摩擦焊原理和分类的基础上，主要介绍连续驱动摩擦焊、搅拌摩擦焊和摩擦焊设备。

根据焊件的相对运动和工艺特点，将摩擦焊进行分类，如图 2-4-1 所示。在实际生产中，连续驱动摩擦焊、惯性摩擦焊、线性摩擦焊和搅拌摩擦焊应用得比较普遍。

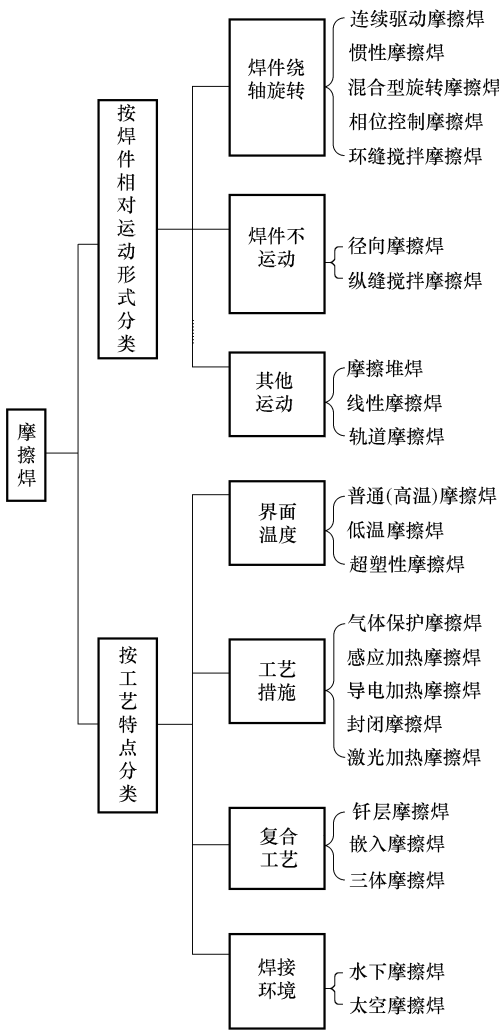


图 2-4-1 摩擦焊方法及分类

4.1 连续驱动摩擦焊

4.1.1 连续驱动摩擦焊的基本原理

1. 连续驱动摩擦焊焊接过程

典型连续驱动摩擦焊的焊接过程如图 2-4-2 所示, 由旋转、摩擦、焊接、顶锻、保持等程序组成。

对于直径为 16mm 的 45 钢, 在转速 2000r/min、摩擦压力 8.6MPa、摩擦时间 0.7s 和顶锻压力 161MPa 下, 其摩擦焊的焊接过程如图 2-4-3 所示。一个周期可分成摩擦加热过程和顶锻焊接过程两部分。摩擦加热过程分为初始摩擦、不稳定摩擦、稳定摩擦和停车四个阶段, 顶锻焊接过程分为纯顶锻和顶锻维持两个阶段。

(1) 初始摩擦阶段 (t_1) 由两个工件开始接触的 a 点起, 到摩擦加热功率显著增大的 b 点止。摩擦开始时, 由于工件待焊接表面不平, 以及存在氧化膜、铁锈、油脂、灰尘和吸附气体等, 使得摩擦因数很大。随着摩擦压力的逐渐增大, 凸凹不平的表面迅速产生塑性变形和机械挖掘现象。塑性变形破坏了界面的金属晶粒, 形成一个晶粒细小的变形层, 摩擦加热功率也慢慢增加, 最后摩擦焊接表面温度将升到 $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 。同时, 在压力和速度的综合影响下, 摩擦表面的加热往往从距圆心半径 $2/3$ 左右的地方首先开始。

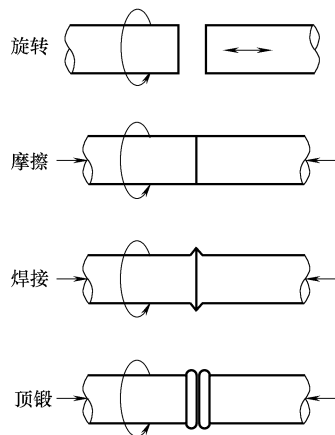


图 2-4-2 连续驱动摩擦焊过程

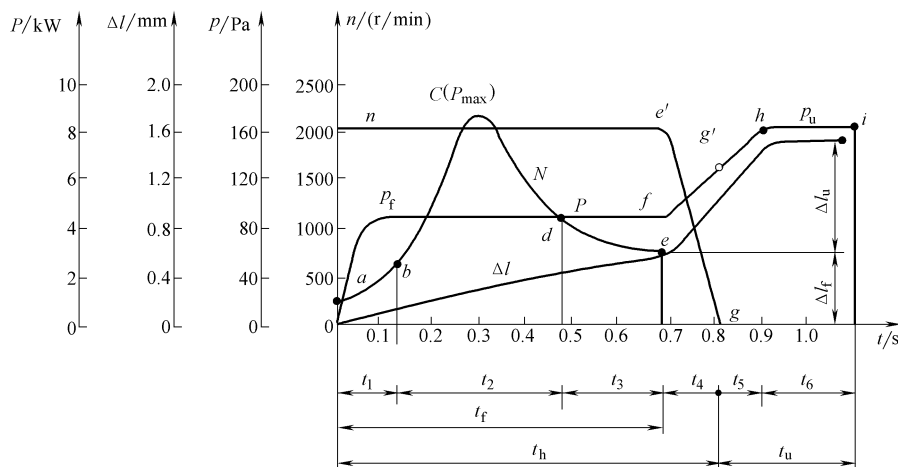


图 2-4-3 摩擦焊的焊接过程示意图 ($\phi 16\text{mm}$, 45 钢)

n —工作转速 p —轴向压力 p_f —摩擦压力 p_u —顶锻压力 Δl_f —摩擦变形量 Δl_u —顶锻变形量
 P —摩擦加热功率 $P_{\max}$ —摩擦加热功率峰值 t_f —摩擦时间 t_h —实际摩擦加热时间 t_u —实际顶锻时间

(2) 不稳定摩擦阶段 (t_2) 该阶段是摩擦加热过程的一个主要阶段, 从 b 点起到功率峰值 c 点, 再到功率稳定值 d 点止。由于摩擦压力较初始摩擦阶段增大, 相对摩擦破坏了焊接金属表面,

使纯净的金属直接接触。随着摩擦焊接表面的温度升高,金属的强度有所降低,而塑性和韧性却有很大的提高,增大了摩擦焊接表面的实际接触面积,这些因素都使材料的摩擦因数增大,摩擦加热功率和摩擦扭矩迅速提高, c 点呈现出最大值,此时摩擦表面温度达 $600 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 。当温度继续升高时,金属的塑性增高,而强度和韧性都显著下降,摩擦加热功率也迅速降低到稳定值 d 点,此时待焊表面的温度升高到 $1200 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ 。摩擦表面的机械挖掘现象减少,振动降低,表面逐渐平整,开始产生金属的粘结现象。高温塑性状态的局部金属表面互相焊合后,又被工件旋转的扭力矩剪断,并彼此过渡,接触良好的塑性金属封闭了整个摩擦面,并使之与空气隔开。

(3) 稳定摩擦阶段(t_3) 稳定摩擦阶段也是摩擦加热过程的主要阶段,从 d 点起,到接头形成最佳温度分布的 e 点为止,这里的 e 点也是焊机主轴开始停车的时间点(可称为 e' 点),也是顶锻压力开始上升的点(图2-4-3的 f 点)以及顶锻变形量的开始点。在稳定摩擦阶段中,工件摩擦表面的温度继续升高,并达到 1300°C 左右。这时金属的粘结现象减少,分子作用现象增强。稳定摩擦阶段的金属强度极低,塑性很大,摩擦因数很小,摩擦加热功率也基本上稳定在一个很低的数值。此外,其他连接参数的变化也趋于稳定,只有摩擦变形量不断增大,变形层金属在摩擦扭矩的轴向压力作用下,从摩擦表面挤出形成飞边,同时,界面附近的高温金属不断补充,始终处于动平衡状态,只是接头的飞边不断增大,接头的热影响区变宽。

(4) 停车阶段(t_4) 停车阶段是摩擦加热过程和顶锻焊接过程的过渡阶段,是从主轴和工件一起开始停车减速的 e' 点起,到主轴停止转动的 g 点止。从图2-4-3可知,实际的摩擦加热时间从 a 点开始,到 g 点结束,即 $t_i = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ 。尽管顶锻压力从 f 点施加,但由于工件并未完全停止旋转,所以 g' 点以前的压力实质上还是属于摩擦压力。顶锻开始后,随着轴向压力的增大,转速降低,摩擦扭矩增大,并再次出现峰值(后峰值扭矩)。同时,在顶锻力的作用下,接头中的高温金属被大量挤出,工件的变形量也增大。因此,停车阶段是摩擦焊的重要过程,直接影响焊接接头的质量,要严格控制。

(5) 纯顶锻阶段(t_5) 从 g (或 g')点起,到顶锻压力上升至最大值的 h 点止。应施加足够大的顶锻压力,精确控制顶锻变形量和顶锻速度,以保证获得优异的焊接质量。

(6) 顶锻维持阶段(t_6) 从 h 点起,到接头温度冷却到低于规定值为止。在顶锻维持阶段,顶锻时间、顶锻压力和顶锻速度应相互配合,以获得合适的摩擦变形量 Δl_f 和顶锻变形量 Δl_u 。在实际计算时,摩擦变形速度一般采用平均摩擦变形速度($\Delta l_f/t_f$),顶锻变形速度也采用其平均值($\Delta l_u/(t_4 + t_5)$)。

总之,在整个摩擦焊过程中,待焊的金属表面经历了从低温到高温摩擦加热,连续发生了塑性变形、机械挖掘、粘结和分子连接的过程变化,形成了一个存在于全过程的高速摩擦塑性变形层,摩擦焊接时的产热、变形和扩散现象都集中在变形层中。在停车阶段和顶锻焊接过程中,摩擦表面的变形层和高温区金属被部分挤碎排出,焊缝金属经锻造成,形成了质量良好的焊接接头。

2. 摩擦焊的产热

摩擦焊过程中,两工件摩擦表面的金属质点,在摩擦压力和摩擦扭矩的作用下,沿工件径向与切向力的合成方向做相对高速摩擦运动,在界面形成了塑性变形层。该变形层是把摩擦的机械功转变成热能的发热层,它的温度高、能量集中,具有很高的加热效率。

(1) 摩擦加热功率 摩擦加热功率的大小及其随摩擦时间的变化,决定了焊接温度及其温度场分布,直接影响接头的加热过程、焊接生产率和焊接质量,同时也关系到摩擦焊机设计与制造。摩擦加热功率就是焊接热源的功率,其计算与分布如下:

对圆形焊件,假设沿摩擦表面径向的摩擦压力 p_f 和摩擦因数 μ 为常数。为了求出功率分布,在摩擦表面上取一半径为 r 的圆环,该环的宽度为 dr (见图2-4-4),其面积为 dA ,则 $dA = 2\pi r dr$,则作用在圆环上的摩擦力为

$$dF = p_f \mu dA = 2\pi p_f \mu r dr \quad (2-4-1)$$

以 O 点为圆心的摩擦扭矩为

$$dM = r dF = 2\pi p_f \mu r^2 dr \quad (2-4-2)$$

圆环上的摩擦加热功率为

$$dP \approx 1.02 dM \times 10^{-3} n \quad (2-4-3)$$

从图 2-4-4 可知, 加热功率在圆心处为零, 在外边缘最大。

将式 (2-4-2)、式 (2-4-3) 积分, 可以得到摩擦焊表面上总的摩擦扭矩和加热功率:

$$M = 2\pi p_f \mu R^3 / 3 \quad (2-4-4)$$

$$P = 2 \times 10^{-3} \pi p_f \eta \mu R^3 / 3 \quad (2-4-5)$$

式中 F ——摩擦表面上的摩擦力;

M ——摩擦扭矩;

P ——摩擦加热功率;

p_f ——摩擦压力;

n ——工件转速;

μ ——摩擦因数;

r ——圆环半径;

R ——待焊工件半径。

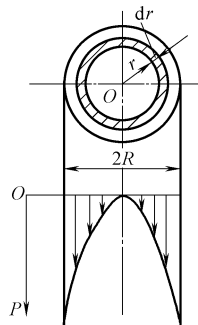


图 2-4-4 摩擦加热功率分布图

实际上 $p_f(r)$ 不是常数, 在初始摩擦阶段和不稳定摩擦阶段的前期, 摩擦表面还没有全面产生塑性变形, 主要是弹性接触, 摩擦压力在中心高, 外圆低。因此沿摩擦焊表面半径 R 的摩擦加热功率最大值不在外圆, 而在距圆心 $2R/3$ 左右的地方, 这一点不仅符合计算结果, 也被试验所证实。在稳定摩擦阶段, 摩擦表面全部产生塑性变形, 成为塑性接触时, $p_f(r)$ 才可以认为等于常数。此外, $\mu(r)$ 在初始摩擦阶段和不稳定摩擦阶段也不是常数, 由高温金属组成的高速塑性变形层热源, 在距圆心 $1/2 \sim 1/3$ 半径处形成环状加热带, 随着摩擦加热的进行, 环状加热带向圆心和外圆迅速开展, 当进入稳定摩擦阶段时, 摩擦表面的温度才趋于平衡, 此时可以认为 $\mu(r)$ 是常数。

摩擦表面上总的加热热量为

$$Q = \int_{t_0}^{t_n} P dt = k \int_{t_0}^{t_n} M ndt \quad (2-4-6)$$

式中 Q ——接合面总的摩擦加热热量;

t ——摩擦时间;

t_0 ——摩擦加热开始时间 (设 $t_0 = 0$);

t_n ——实际摩擦加热时间;

k ——常数。

图 2-4-4 显示出总摩擦加热功率 P 随摩擦加热时间 t 的变化规律, 从图中可知, $P(t) \neq$ 常数, 也表明 $M(t) \neq$ 常数。但是, 由于在整个加热过程中工件半径 R 、主轴转速 n 和摩擦压力 p_f 基本不变, 仅摩擦因数发生了变化, 其变化规律与加热规律随加热时间的变化相类似。在钢的摩擦加热过程中, 摩擦因数由小到大, 达到最大值后又逐渐变小, 其变化规律与摩擦焊界面的升温有关, 在常温下钢的摩擦因数很小, $600 \sim 700^\circ\text{C}$ 时最大, $1200 \sim 1300^\circ\text{C}$ 时又变小。

(2) 摩擦焊表面温度 摩擦焊表面的温度直接影响接头的加热温度、温度分布、摩擦因数、接头金属的变形与扩散。其加热面的温度由摩擦加热功率和散热条件所决定。

在焊接圆断面工件时, 摩擦焊热源被认为是一个线性传播的连续均布的面状热源。如果不考虑向周围空间的散热, 根据雷卡林的焊接热过程计算公式, 同种金属摩擦焊接表面的温度为

$$T(0, t) = q_2 \sqrt{t} / \sqrt{\pi \lambda c} \quad (2-4-7)$$

式中 $T(0, t)$ ——摩擦焊表面温度 (0 为表面热源中心, t 是摩擦加热时间);

q_2 ——单位面积上的加热热量;

λ ——焊件热导率;

c ——焊件热容。

在式 (2-4-7) 中, 如果选定焊接所需要的温度为 T_w , 热源温度升高到 T_w 所需要的摩擦加热时间为 t'_f , 则该式可写成

$$t'_f q_2^2 = c \pi \lambda T_w^2 = \text{常数} \quad (2-4-8)$$

从式 (2-4-8) 可以看出, 当 T_w 和 t'_f 确定以后, 能够计算出 q_2 的数值, 并可以根据 q_2 的要求选择焊接参数。式 (2-4-7) 和式 (2-4-8) 适合于计算以稳定摩擦阶段为主的摩擦加热过程。

实际上, 不论何种材料的摩擦焊, 摩擦表面的最高温度是有限制的, 不能超过材料的熔点, 此外, 在采用式 (2-4-7) 和式 (2-4-8) 进行运算时, 还应该考虑到摩擦焊表面温度和加热功率之间的内在联系、相互制约及摩擦加热功率随摩擦时间变化的特殊规律。

4.1.2 连续驱动摩擦焊的焊接工艺

1. 工艺特点

1) 焊接施工时间短和生产效率高。例如发动机排气门双头自动摩擦焊机的生产率可达 800 ~ 1200 件/h。对于外径 $\Phi 127\text{mm}$ 、内径 $\Phi 95\text{mm}$ 的石油钻杆与接头的焊接, 连续驱动摩擦焊仅需要十几秒。

2) 焊接热循环引起的焊接变形小。焊后尺寸精度高, 不用焊后矫形和消除应力。用摩擦焊生产的柴油发动机预燃烧室, 全长误差为 $\pm 0.1\text{mm}$; 专用焊机可保证焊后的长度公差为 $\pm 0.2\text{mm}$, 偏心度为 0.2mm 。

3) 机械化、自动化程度高且焊接质量稳定。给定焊接条件后, 操作简单, 不需要特殊的焊接技术人员。

4) 适合各类异种材料的焊接。常规熔焊不能焊接的铝—钢、铝—铜、钛—铜、金属间化合物—钢等都可以进行焊接。

5) 可以实现同直径等截面和不同直径的板材、棒材及管材的焊接。

6) 少污染和节能。焊接时不产生烟雾、弧光以及有害气体等, 不污染环境。与闪光焊相比, 电能节约 5 ~ 10 倍。

但是, 摩擦焊也具有如下缺点与局限性:

1) 对非圆形截面焊接较困难, 所需设备复杂; 对盘状薄零件和薄壁管件, 由于不易夹固, 施焊比较困难。

2) 对形状及组装位置已经确定的构件, 很难实现摩擦焊接。

3) 接头容易产生飞边, 焊后需进行机械加工。

4) 夹紧部位容易产生划伤或夹持痕迹。

2. 接头形式设计

连续驱动摩擦焊可以实现棒材-棒材、管材-管材、棒材-管材、棒材-板材及管材-板材的可靠连接, 接合面形状对获得高质量的接头非常重要, 图 2-4-5 给出了常用的接头形式。图 2-4-5a 的接头形式具有相同形状的接合面, 如果是同种材料, 两者的产热及散热均相同, 温度场对称, 可以获得较宽的焊接参数范围和得到可靠性高的接头, 如果是异种材料连接, 因材料的物理性能不同, 产热及散热不一样, 温度场不对称, 需要选择合适的焊接参数和质量控制方法。生产实际中类似图 2-4-5b 的接头形式较多, 两个待焊件的直径不同, 此时需将直径大的材料进行焊前加工出凸台, 使

接合部位的形状相同。为了节省焊前加工的生产成本,可以采用2-4-5c的接头形式直接进行焊接,但应保持使大直径的接合面不产生倾斜;同时,要增大摩擦压力,必须在短时间内停止相对运动,要求设备要有好的刚度。薄板和棒材的摩擦焊接头形式如图2-4-5d所示,对设备的同心度要求高,如果是异种材料连接,高温强度好的母材应采用较小的直径。图2-4-5e是具有一定斜度的接头形式,主要用于机械设备中齿轮的摩擦焊。图2-4-5f的接头允许一定量的飞边存在,主要用于柴油机燃烧室喷嘴、推土机下部齿轮的制造。

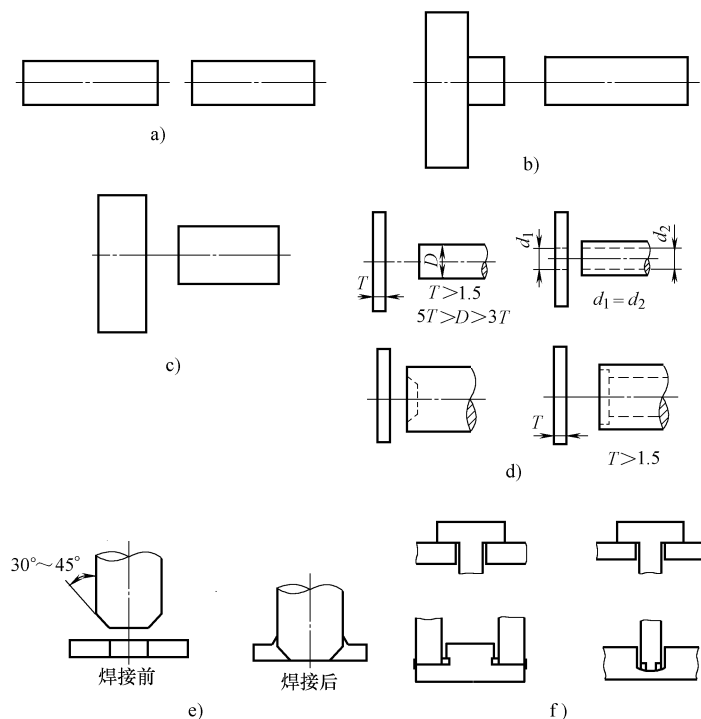


图2-4-5 连续驱动摩擦焊接头的基本形式

a) 相同直径 b) 不同直径 (有凸台) c) 不同直径 (无凸台)
d) 薄板与棒 (或管) e) 倾斜接头 f) 带飞边槽的接头

连续驱动摩擦焊接头形式在设计时主要遵循以下原则:

- 1) 在旋转式摩擦焊的两个工件中,至少要有有一个工件具有回转断面。
- 2) 焊接工件应具有较大的刚度,夹紧方便、牢固,要尽量避免采用薄管和薄板接头。
- 3) 同种材料的两个焊件断面尺寸应尽量相同,以保证焊接温度分布均匀和变形层厚度相同。
- 4) 一般倾斜接头应与中心线成 $30^\circ \sim 45^\circ$ 的斜面。
- 5) 对锻压温度或热导率相差较大的异种材料焊接时,为了使两个零件的锻压和顶锻相对平衡,应调整界面的相对尺寸,为了防止高温下强度低的工件端面金属产生过多的变形流失,需要采用模子封闭接头金属。
- 6) 为了增大焊缝面积,可以把焊缝设计成搭接或锥形接头。
- 7) 焊接大断面接头时,为了降低加热功率峰值,可以采用将焊接端面倒角的方法,使摩擦面积逐渐增大。
- 8) 对于棒—棒和棒—板接头,中心部位材料被挤出形成飞边时,要消耗更多的能量,而焊缝中心部位对扭矩和弯曲应力的承担又很少,所以,如果工件条件允许,可将一个或两个零件加工出

中心孔,这样既可用较小功率的焊机,又可提高生产率。

9) 待焊表面应避免渗氮、渗碳等。

10) 设计接头形式的同时,还应注意工件的长度、直径公差、焊接端面的垂直度、平面度和表面粗糙度。

3. 连续驱动摩擦焊的焊接参数

连续驱动摩擦焊的主要焊接参数有转速、摩擦压力、摩擦时间、摩擦变形量、停车时间、顶锻时间、顶锻压力、顶锻变形量,其中,摩擦变形量和顶锻变形量(总和为缩短量)是其他参数的综合反映。

(1) 转速与摩擦压力 转速和摩擦压力直接影响摩擦扭矩、摩擦加热功率、接头温度场、塑性层厚度以及摩擦变形速度等。转速和摩擦压力的选择范围很宽,它们不同的组合可得到不同的规范,常用的组合有强规范和弱规范。强规范时,转速较低,摩擦压力较大,摩擦时间短;弱规范时,转速较高,摩擦压力小,摩擦时间长。

(2) 摩擦时间 摩擦时间影响接头的温度、温度场和质量。如果时间短,则界面加热不充分,接头温度和温度场不能满足焊接要求;如果时间长,则消耗能量多,热影响区大,高温区金属易过热,变形大,飞边也大,消耗的材料多。碳钢工件的摩擦时间一般在 $1\sim 40\text{s}$ 。

(3) 摩擦变形量 摩擦变形量与转速、摩擦压力、摩擦时间、材质的状态和变形抗力有关,要得到牢固的接头,必须有一定的摩擦变形量,通常选取的范围为 $1\sim 10\text{mm}$ 。

(4) 停车时间和顶锻延时 停车时间是转速由给定值下降到零所对应的时间,直接影响接头的变形层厚度和焊接质量,当变形层较厚时,停车时间要短;当变形层较薄而且希望在停车阶段增加变形层厚度时,则可加长停车时间,其选取范围为 $0.1\sim 1\text{s}$ 。

顶锻延时是为了调整摩擦扭矩后峰值和变形层厚度,在停车前施加顶锻压力或者停车时不制动都会使变形层厚度增大,但也可能会引起后峰值扭矩过大和金属组织扭曲。

(5) 顶锻压力、顶锻变形量和顶锻变形速度 顶锻压力的作用是挤出摩擦塑性变形层中的氧化物和其他有害杂质,并使焊缝得到锻压,结合牢靠,晶粒细化。顶锻压力的选择与材质、接头温度、变形层厚度以及摩擦力有关。材料的高温强度高时,顶锻压力要大;温度高、变形层厚度小时,顶锻压力要小(较小的顶锻压力就可得到所需要的顶锻变形量);摩擦压力大时,相应的顶锻压力要小一些。顶锻变形量是顶锻压力作用结果的具体反映。顶锻变形量一般选取 $1\sim 6\text{mm}$ 。顶锻速度对焊接质量影响很大,如顶锻速度慢,则达不到要求的顶锻变形量,顶锻速度一般为 $10\sim 40\text{mm/min}$ 。

4. 焊接参数对接头质量的影响

以低碳钢的连续驱动摩擦焊为例,介绍摩擦焊焊接参数对接头质量的影响。

(1) 转速和摩擦压力 在摩擦焊的焊接参数中,转速和摩擦压力是最主要的焊接参数。当工件直径一定时,转速代表摩擦速度。一般将达到焊接温度时的转速称为临界摩擦速度,为了使界面的变形层加热到金属材料的焊接温度,转速必须高于临界摩擦速度,一般来讲,低碳钢的临界摩擦速度为 0.3m/s 左右,平均摩擦速度的范围为 $0.6\sim 3\text{m/s}$ 。

在稳定摩擦阶段,转速对焊接表面的摩擦变形层厚度及深塑区的位置如图2-4-6所示。当转速为 1000r/min 时,由于外圆的摩擦速度大,外侧金属的温度升高,此时,摩擦表面的温度比高速摩擦时低,摩擦扭矩和摩擦变形速度增大,并移向外圆,因此外圆的变形层较中心厚。这时变形层金属非常容易流出摩擦表面之外,形成不对称的肥大飞边(见图2-4-6a)。这种接头的温度分布梯度大,变形层金属容易被大量挤出,焊缝金属迅速更新,能够有效地防止氧化。

当转速升高时,摩擦表面温度升高,摩擦扭矩和摩擦变形速度小,深塑区移向圆心,这时变形层中的高温粘滞金属,在摩擦压力和摩擦扭矩的作用下向外流动时,受到较大的阻碍,形成了对称

的小薄翅状飞边,如图2-4-6c所示。这种接头由于扭矩小,挤出的金属少,所以接头的温度分布较宽,变形层金属也容易氧化。

摩擦压力对焊接接头的质量有很大影响,为了产生足够的摩擦加热功率,保证摩擦表面的全面接触,摩擦压力不能太小。在稳定摩擦阶段,当摩擦压力增大时,摩擦扭矩增大,摩擦加热功率升高,摩擦变形速度增大,变形层加厚,深塑区增宽并向外圆移动,在压力的作用下,形成粗大而不规则的飞边。摩擦压力大时,接头的温度分布梯度大,变形层金属不容易氧化。在摩擦加热过程中,摩擦压力一般为定值,但是为了满足焊接工艺的特殊要求,摩擦压力也可以不断上升,或采用两级或三级加压。

不同的转速和摩擦压力的组合,可以得到不同的焊接加热规范。摩擦焊可选用的规范很宽,而最常用的组合方式有两种,一种是强规范,即转速较低,摩擦压力大,摩擦时间短;另一种是弱规范,即转速较高,摩擦压力小,摩擦时间长。

(2) 摩擦时间与摩擦变形量 摩擦时间决定了接头摩擦加热过程,直接影响接头的加热温度、温度分布和焊接质量。摩擦时间短时,焊接表面加热不完全,不能形成完整的塑性变形层,接头上的温度和温度分布不能满足焊接质量要求。摩擦时间过长,接头温度分布宽,高温区金属容易过热,摩擦变形量大,飞边大,消耗的加热能量多。选择摩擦时间时,一般希望在摩擦终了的瞬间,接头上有较厚的变形层或较宽的高温金属区,接头有较小的飞边。而在顶锻焊接过程中产生较大的顶锻变形量,使变形层的面积沿工件径向有很大的扩展,将变形层中的高温金属挤碎、挤出、产生一定的飞边。这样整个飞边的尺寸不大,但形状封闭圆滑,有利于改善接头的焊接质量。因此,碳钢在强规范焊接时,当摩擦加热功率越过极值,下降到稳定值左右时,就应立即停车,并进行顶锻焊接。在弱规范焊接时,通过一段较长时间的稳定摩擦以后,才能停车顶锻焊接。连续驱动摩擦焊的摩擦时间通常在1~40s。

当摩擦变形速度一定时,摩擦变形量和摩擦时间成正比,因此常用摩擦变形量代替摩擦时间来控制摩擦加热过程。在焊接低碳钢时,摩擦变形量可在1~10mm的范围内选择。

(3) 停车时间 图2-4-7是停车时间和摩擦峰值扭矩的关系,由于停车时间对摩擦扭矩、变形层厚度和焊接质量有很大影响,因此应根据变形层厚度正确选择该参数。当摩擦表面的变形层很厚时,停车时间要短;当表面上的变形层比较薄时,为在停车阶段能产生较厚的变形层,停车时间可以延长。有时为了改善焊接质量,消除焊缝中的氧化物或脆性化合物层,必须增大停车时的变形层厚度。一般在停车前就施加顶锻压力,或停车时不制动。但是,要防止过大的后峰值扭矩使接头金属产生扭曲组织,通常停车时间选择范围为0.1~1s。

(4) 顶锻压力与变形量 顶锻压力的作用是挤碎和挤出变形层中的氧化金属及其他有害杂质,并使接头金属在压力作用下得到锻造,促进晶粒细化,从而提高接头力学

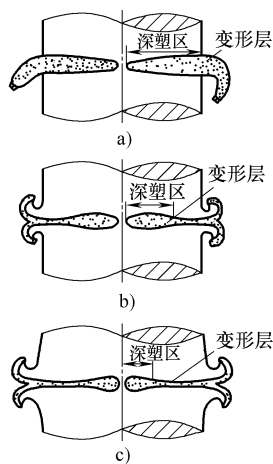


图2-4-6 转速与变形层厚度、深塑区位置和飞边的关系 ($\Phi 19\text{mm}$ 低碳钢棒, 摩擦压力 86MPa)

a) 1000r/min b) 2000r/min
c) 4000r/min

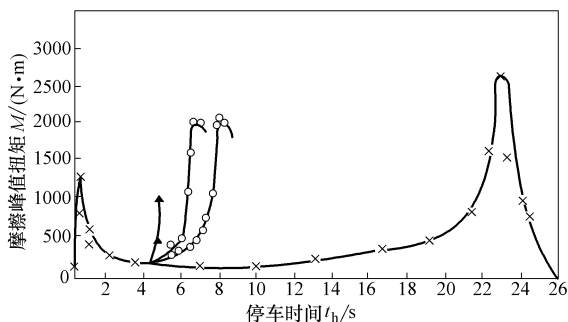


图2-4-7 停车时间和摩擦峰值扭矩的关系

性能。顶锻变形量是顶锻压力作用的结果,如果顶锻力太小,焊接质量低;如果顶锻压力过大,会使接头变形量增加,飞边增大,严重时在焊缝金属中形成低温横向流动的弯曲组织,使接头的疲劳强度降低。

顶锻压力的大小取决于焊接工件的材料、接头的温度大小及分布、变形层的厚度,此外还决定于摩擦压力的大小。如果焊接材料的高温强度高,就需要大的顶锻压力。如果接头的温度高,变形层较厚,就必须采用较小的顶锻压力。此外,在顶锻压力确定以后,为了得到一定要求的顶锻变形量,对顶锻压力的施加速度也有要求,如果不在一定的高温下进行顶锻,将得不到合适的顶锻变形量。

4.1.3 焊接参数的检测及控制

1. 焊接参数检测

摩擦焊接参数大体上可以分为独立参数和非独立参数。独立参数可以单独设定和控制,主要包括主轴转速、摩擦压力、摩擦时间、顶锻压力、顶锻维持时间。所谓非独立参数,就是该参数需要由两个或两个以上的独立参数以及材料的性质所决定,主要包括摩擦焊扭矩、焊接温度、摩擦变形量、顶锻变形量等。

(1) 摩擦开始信号的判定 连续驱动摩擦焊时,无论检测摩擦时间或检测摩擦变形量,都涉及摩擦开始时刻的判定问题。实际中应用的主要方法有功率极值判定法、压力判定法、主机电流比较法。功率极值判定法是以摩擦加热功率达到峰值的时刻作为摩擦时间的起点,需要注意的是,大面积工件摩擦焊时,在不稳定摩擦阶段存在功率的多峰值现象。压力判定法是当工件接触、开始摩擦时,作用在工件上的压力逐渐升高,以压力继电器动作的时刻作为摩擦时间的开始。主机电流比较法是工件摩擦开始后,以主机电流上升到某一给定值所对应的时刻作为摩擦计时的始点。这三类检测方法都可以通过硬件或软件实现开始信号的检测和判定。

(2) 变形量的测量 变形量的测量比较简单,常采用电感式位移传感器(含差动式)、光栅位移传感器等。摩擦焊时,将传感器的输出信号输入到计算机中,取出对应于各阶段的特征值(如摩擦开始、顶锻开始、顶锻维持结束等时刻),将这些特征值作为计算相应阶段变形量的相对零点。

(3) 主轴的转速和压力的测量 主轴转速测量常采用磁通感应式转速计、光电式转速计以及测速发电机等。压力测量通常采用压力表外,还采用电阻丝应变片和半导体应变片等。

(4) 接头温度的测量 焊接温度测量一般采用热电偶或红外测温仪两种方法。采用热电偶可以测量摩擦焊工件的内部温度,为了解决工件在转动时的测量问题,可将布置在旋转工件上的热电偶通过补偿导线连接到引电器上,焊接时,引电器的内环随工件一起旋转,各输入端则始终与相应内环的输入端相连。应注意,测量前必须对热电偶的动特性进行标定,还应对测得的数据进行修正,才能得到真实的温度。这种测量方法的缺点是热惯性大,反应不够灵敏。红外测温属非接触测量,用于测量工件的表面温度场。光学探测器瞬间接受工件上某个部位的单元信息,扫描机构依次对工件进行二维扫描,接收系统按时间先后依次接受信号,经放大处理,变为一维时序视频信号送到显示器,与同步机构送来的同步信号合成后,显示出焊件图像和温度场的信息。

(5) 摩擦扭矩的测量 摩擦扭矩综合反映了轴向压力、工件转速,界面温度、材质特性及其他它们之间的相互影响,是连续驱动摩擦焊接的一个重要参数,该参数变化速度快、变化范围大。主要测量方法有电阻应变片法(将电阻应变片贴在工件上,好处是灵敏度高,不足之处是不适宜在生产现场使用,当主轴刚度大、被焊面积小且采用软规范时误差较大)、磁弹扭矩传感器法(利用铁磁材料受机械力作用时导磁性能发生变化的磁弹现象,测量误差较大)、轮辐射扭矩传感器法(测主电动机的输出扭矩,是一种近似测量法)和主电动机定子电压电流法。

主电动机定子电压电流法缩写为 VCMM (voltage and current of major motor),连续驱动摩擦焊

时, 摩擦扭矩 $M(t)$ 和摩擦加热功率 P 分别为

$$M(t) = 2\pi \int_0^R \mu(r, t) p(r, t) r^2 dr \quad (2-4-9)$$

$$P = \frac{\pi^2}{15} \int_0^R n(t) \mu(r, t) p(r, t) r^2 dr \quad (2-4-10)$$

式中 $\mu(r, t)$ ——摩擦因数;

$p(r, t)$ ——摩擦压力;

R ——工件半径;

r ——工件摩擦表面某点到工件轴心的距离;

$n(t)$ ——摩擦转速。

由于 $n(t)$ 与 r 无关, 所以

$$P = \frac{\pi}{30} n(t) M(t) \quad (2-4-11)$$

目前, 可采用计算机实现主电动机定子电压和电流以及摩擦转速的实时同步检测, 首先计算出主电动机的输入功率, 再通过对摩擦焊接过程各种功率损耗的分析、计算, 求出作用于摩擦焊接头的加热功率, 根据式 (2-4-11) 求出摩擦焊过程的动态扭矩。

2. 焊接参数的控制

当焊接材料、接头形式和焊接参数确定后, 摩擦焊焊接接头的质量主要取决于焊接参数的稳定。因此, 进行焊接过程控制时, 主要是控制工艺过程和焊接参数, 对于连续驱动摩擦焊, 控制方法主要有以下 6 种。

(1) 时间控制 主要是控制摩擦时间, 可采用计算机的计数器或定时器进行控制。

(2) 功率峰值控制 利用摩擦加热功率峰值到稳定值之间时间不变的原则进行控制, 主要应用于碳钢和低合金钢的强规范 (即转速较低、摩擦压力较大、摩擦时间短) 焊接。实际上, 由于加热功率的多峰值现象以及焊接参数的变化和工件表面状态的差异, 都会引起功率峰值到稳定值的时间不同, 因而, 这种控制方法的应用受到限制。

(3) 变形量控制 通常控制摩擦变形量, 但为了克服由于工件表面状态和其他参数变化对这种控制方法带来的不利影响, 还可同时对摩擦焊焊接时间进行监控。

(4) 温度控制 主要通过对工件表面温度的非接触测量而进行相应的控制。

(5) 变参数复合控制 该方法主要针对大截面工件的摩擦焊, 其核心是不同阶段采用不同的控制方案。在一级摩擦阶段, 同时进行时间控制和压力控制 (时间和压力复合控制), 在二级摩擦阶段同时进行变形量和变形速度控制 (变形量和变形速度复合控制); 在顶锻阶段同时进行压力控制和时间控制 (时间和压力复合控制)。

(6) Mt 控制 该方法是通过摩擦扭矩 M 对摩擦时间 t 的积分运算实现焊接过程能量的控制。具体方法是从功率达到最大值的 t_0 时刻起计算摩擦热量, 在摩擦热量达到 Q_0 时的 t_n 时刻停止摩擦加热过程而进入顶锻过程, 从而实现焊接过程的能量控制。

3. 摩擦焊过程的微计算机控制

目前的焊接设备, 大多数具有计算机控制功能, 可控制整个焊接过程, 包括液压系统控制、摩擦开始点和焊接参数检测, 以及焊接参数复合控制和参数记录、输出等, 图 2-4-8 为压力和变形量复合控制流程框图。

4.1.4 典型材料的摩擦焊

1. 材料的摩擦焊焊接性

材料的摩擦焊焊接性是指材料在摩擦焊过程中形成优质接头的能力。所谓优质接头, 一般是指

和母材等强度及等塑性,所涉及的材料有金属材料、陶瓷材料、复合材料、塑料等。

影响材料摩擦焊焊接性的因素主要有以下方面:

(1) 材料的互溶性 同种材料或互溶性好的异种材料容易进行摩擦焊,有限互溶、不能相互溶解和扩散的两种材料,很难进行摩擦焊。

(2) 材料表面的氧化膜 金属表面上的氧化膜如果容易破碎,则接合就比较容易,如低碳钢的摩擦焊焊接性比不锈钢好。

(3) 材料的力学性能 高温强度高、塑性低、导热性好的材料不容易焊接,力学性能差别大的异种材料不容易焊接。

(4) 合金的碳当量 碳当量高、淬硬性好的合金材料焊接比较困难。

(5) 高温氧化性 一些活性金属及高温氧化性大的材料难以焊接。

(6) 生成的脆性相 凡是能形成脆性化合物层的异种材料,很难获得高可靠性的焊接接头,对这类材料,在焊接过程中,必须设法降低焊接温度或减少焊接时间,以控制脆性化合物层的长大,或者添加过渡金属层进行摩擦焊。

(7) 摩擦因数 摩擦因数低的材料,加热功率低,得到的焊接温度低,就不容易保证接头的质量,如焊接黄铜、铸铁等就比较困难。

(8) 材料的脆性 大多数金属材料都具有很好的摩擦焊焊接性,对于焊接性不好的陶瓷材料及异种材料,为了提高接头性能,摩擦焊时应选用合适的过渡金属层。

图2-4-9是同种和异种材料组合的摩擦焊焊接性,应注意,某些摩擦焊焊接性不好的材料,随着摩擦焊工艺的发展和设备改进有可能成为可焊接材料。例如钼—钼,同种材料连续驱动摩擦焊的焊接性“未作实验”,惯性摩擦焊的焊接性属于“接头有足够的强度”,而搅拌摩擦焊的焊接性则属“焊接性较差”。

2. 焊接参数的选择

一般来讲,碳钢的连续驱动摩擦焊参数选择范围为:摩擦速度0.6~3m/s,摩擦压力20~100MPa,摩擦时间1~40s,变形量1~10mm,停车时间0.1~1s,顶锻力100~200MPa,顶锻变形量1~6mm,顶锻速度10~40mm/s。中碳钢、高碳钢、低合金钢及其组合的异种钢焊接时,其焊接参数选择可以参考低碳钢的焊接参数。为了防止中碳钢、高碳钢和低合金钢焊缝中的淬火组织,减少焊后回火处理工序,应选用较小的焊接参数。应注意,焊接高温强度差的高合金钢时,需要增大摩擦压力和顶锻压力,适当延长摩擦时间。焊接管子时,为了减少内毛刺,在保证焊接质量的前提下,应尽量减少摩擦变形量和顶锻变形量。

焊接高温强度差别比较大的异种钢或某些不产生脆性化合物的异种金属时,除了在高温强度低的材料一方加模子以外,还要适当延长摩擦时间,提高摩擦压力和顶锻压力。焊接容易产生脆性化合物的异种金属时,需要采用一定的模具封闭接头金属,降低焊接速度,增大摩擦压力和顶锻压力。

焊接大直径工件时,在摩擦速度不变的情况下,应相应地降低转速。工件直径越大,摩擦压力

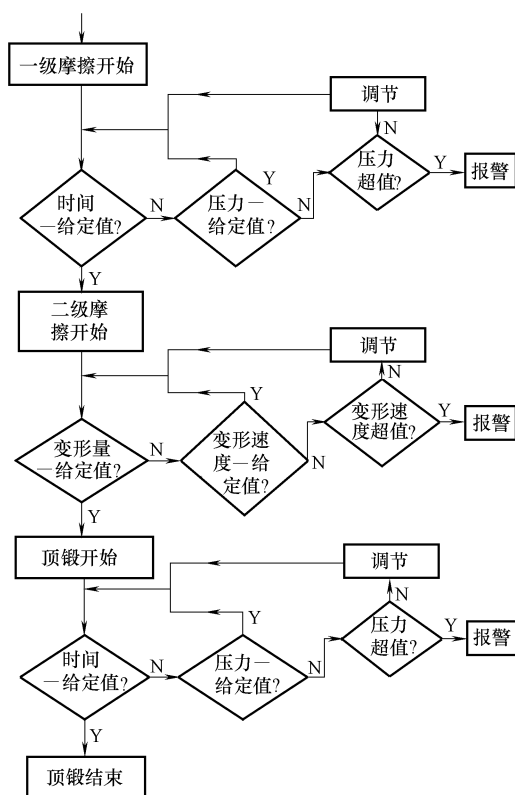


图 2-4-8 压力和变形量复合控制流程框图

[illegible]

图 2-4-9 同种和异种材料组合的摩擦焊焊接性

在摩擦表面上的分布越不均匀，摩擦变形阻力越大，变形层的扩展也需要较长的时间。焊接不等端面的碳钢和低合金钢时，由于导热条件不同，在接头上的温度分布和变形层的厚度也不同，为了保证焊接质量，应该采用强规范焊接。

目前在生产中所采用的焊接参数,都需要通过试验方法确定,还很难采用计算的方法进行参数优化和确定。

表 2-4-1 为几种典型材料的连续驱动摩擦焊的焊接参数, 表 2-4-2 是几种典型零件的连续驱动摩擦焊的焊接参数。

表 2-4-1 典型材料的连续驱动摩擦焊的焊接参数

序号	焊接材料	接头直径/mm	焊接参数				备注
			转速/ (r/min)	摩擦压力 /MPa	摩擦时间 /s	顶锻压力 /MPa	
1	45 钢 + 45 钢	16	2000	60	1.5	120	—
2	45 钢 + 45 钢	25	2000	60	4	120	—
3	45 钢 + 45 钢	60	1000	60	20	120	—
4	不锈钢 + 不锈钢	25	2000	80	10	200	—
5	高速钢 + 45 钢	25	2000	120	13	240	采用模子
6	铜 + 不锈钢	25	1750	34	40	240	采用模子
7	铝 + 不锈钢	25	1000	50	3	100	采用模子
8	铝 + 铜	25	208	280	6	400	采用模子
9	铝 + 铜, 端面锥角 60° ~ 120°	8 ~ 50	1360 ~ 3000	20 ~ 100	3 ~ 10	150 ~ 200	两端采用模子
10	GH4169	20	2370	90	10	125	—
11	GH3536	20	2370	65	16	95	—
12	30CrMnSiNi2A	20	2370	30	6	55	—
13	40CrMnSnMoVA	20	2370	35	3	78	—
14	1Cr18Ni9Ti	25	2000	40	10	100	—

表 2-4-2 典型零件的连续驱动摩擦焊焊接参数

零件名称		材料组合	工件直径 /mm	摩擦焊焊接参数					
				主轴转速 /(r/min)	摩擦压强 /(N/mm ²)	摩擦时间 /s	顶锻压强 /(N/mm ²)	顶锻保压 时间/s	顶锻滞后 刹车时间/s
汽车后桥管		45 + 45	外径 70 内径 50	99	55 ~ 60	14 ~ 18	110 ~ 130	6 ~ 8	0.2 ~ 0.3
液压千斤 顶支承缸	内筒	20 + 45	外径 47 内径 45	1150	126	1 ~ 2	244	6	0.2
	外筒	20 + 45	外径 76 内径 —	1150	87	1 ~ 1.5	130	4 ~ 6	0.2
汽车排气阀		5Cr21Ni4Mn9N + 40Cr	10.5	焊 2500 切边 1250	140	4	300	3	0.2 ~ 0.3
自行车涨闸闸壳		20 ~ 35 + 45		3000	5 ~ 4.5	1.5 ~ 2	65 ~ 70	2 ~ 3	0 ~ 0.15
铝合金自行车轴壳		LD5 + LD5	16.5	2500	45	3	90	4 ~ 5	0.1 ~ 0.15
柴油机增压器叶轮		731 等耐热 合金 + 40Cr	27	1350	70(1) ② 100(2)	3(1) 12(2)	300	7	0 ~ 0.1
汽车后桥壳		16Mn + 45 或 40Mn	152	585	30(1) 50 ~ 60(2)	5(1) 20 ~ 25(2)	100 ~ 120	10	—
石油钻杆		40Cr 或 42SiMn35CrMo	外径 63 ~ 140 壁厚 10 ~ 17	585	30(1) 50 ~ 60(2)	6 ~ 8(1) 24 ~ 30(2)	120	10 ~ 20	—
铲车活塞杆		40Cr + 40Cr	90	585	20 ~ 30(1) 50 ~ 60(2)	15 ~ 20(1) 35 ~ 40(2)	100 ~ 120	15 ~ 20	—
刀具柄①		高速钢 + 45	14	2000	120	10	240	—	—
铝铜管		Al + Co	—	1500	40	2.5	250	5	—

① 焊后立即在 750℃ 炉中保温，退火。
② 括号内数字为摩擦级数。

3. 某些典型材料的摩擦焊

(1) 45 钢的接头组织和性能 45 钢的摩擦焊焊接参数见表 2-4-2，接头的金属组织如图2-4-10 所示，可以分为正火区、不完全正火区和回火区。正火区是接头金属被加热到 850℃ 以上的区域，又称高温区，主要包括未被挤出的高速摩擦塑性变形金属以及在高温产生塑性变形的母材。该区组织通常是力学性能良好的索氏体，但接头加热时间太短或太长时，也可能产生硬度很高的马氏体组

织或晶粒粗大的过热组织。正火区是接头金属被加热到 $723 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 之间的区域, 通常这个区域的金相组织都是索氏体和铁素体组织。但是, 当接头的加热和冷却速度太快时, 也可能产生马氏体组织。回火区是接头金属被加热至 723°C 以下的区域。由于加热时间很短, 其金相组织不产生明显的变化。

对上述规范下摩擦焊接头的质量检验表明, 在焊缝中没有产生未焊透、夹杂、气孔、裂纹和金属过热等缺陷, 接头的加热区很窄, 拉伸试验断裂在母材, 弯曲试验弯曲角可达 180° , 冲击韧度高, 焊接质量好。

(2) 铝-铜过渡接头的焊接 对于 $\phi 8 \sim \phi 50\text{mm}$ 铝-铜过渡接头, 摩擦焊的焊接参数见表 2-4-1 中的 9, 为了防止铝在焊接过程中的流失, 以及铝、铜试件由于受压失去稳定而产生弯曲变形, 采用如图 2-4-11 所示的模子对铝、铜进行封闭加热。接头的力学性能表明, 静载拉伸大多断裂在铝母材一侧, 并可以弯曲成 180° 角。但是, 如果焊接加热温度过高或焊接加热时间过长, 摩擦焊接表面的温度超过铝-铜共晶温度 (548°C), 甚至达到铝的熔点, 在高温下容易形成大量的脆性化合物层, 使接头发生脆性断裂。

为了获得优质接头, 可采用低温摩擦焊工艺, 其焊接参数见表 2-4-1 中的 8。该工艺的特点是转速低, 顶锻压力大。为了增大后峰的摩擦扭矩、增加接头的变形量, 以达到破坏摩擦表面上的脆性合金薄层和氧化膜的目的。低温摩擦焊工艺可以控制摩擦表面的温度在 $460 \sim 480^{\circ}\text{C}$ 范围内, 保证摩擦表面金属能充分发生塑性变形和促进铝-铜原子之间的充分扩散, 不产生脆性金属间化合物, 接头的力学性能高, 热稳定性也好。

(3) 高速钢-45 钢的焊接 高速钢和 45 钢焊接时, 由于高速钢的高温强度高而热导率低, 而 45 钢的高温强度差, 为了控制 45 钢的变形和流失, 提高摩擦压力, 增大摩擦加热功率和保证接头外圆焊透, 必须采用合适的模子, 如图 2-4-12 所示, 将 45 钢进行封闭加压, 按照表 2-4-3 选择焊接参数。在摩擦加热过程中, 随着摩擦加热时间的延长, 接头温度升高, 高速摩擦塑性变形层由高速钢和 45 钢的交界处向高速钢内部移动, 形成了高速钢与高速钢的摩擦过程。因此, 为了使接头产生足够的塑性变形和足够大的加热功率, 必须提高摩擦压力和顶锻压力。应注意, 为了防止接头的焊接热裂纹, 除材料尽量选择不会产生碳化物严重偏析的高速钢外, 焊前还应将高速钢进行完全退火, 焊接时接头要均匀加热, 使温度分布较宽, 摩擦时间不能太短。焊接后应进行缓冷, 并立即在 750°C 进行炉中保温, 然后再进行退火。

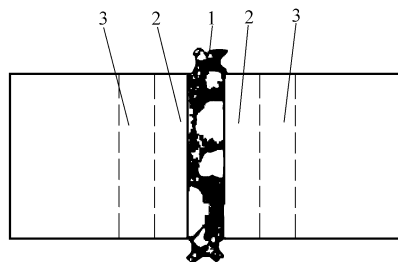


图 2-4-10 45 钢摩擦焊接头的金相组织
1—正火区 2—不完全正火区 3—回火区

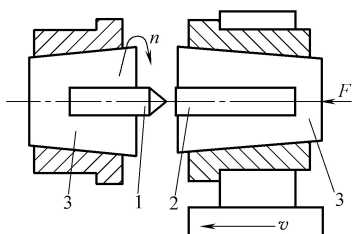


图 2-4-11 铝-铜摩擦焊接示意图
1—铜工件 2—铝工件 3—模子
 n —铜工件转速 F —轴向力
 v —移动夹头进给速度

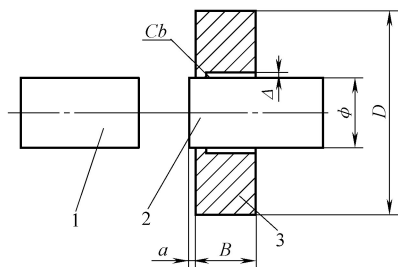


图 2-4-12 高速钢-45 钢摩擦焊示意图
1—高速钢 2—45 钢 3—模子

表 2-4-3 高速钢-45 钢摩擦焊焊接参数

接头直径/mm	转速/(r/min)	摩擦压力/MPa	顶锻时间/s	顶锻压力/MPa	备注
14	2000	120	10	240	采用模子
20	2000	120	12	240	采用模子
30	2000	120	14	240	采用模子
40	1500	120	16	240	采用模子
50	1500	120	18	240	采用模子
60	1000	120	20	240	采用模子

(4) 锅炉蛇形管的摩擦焊 锅炉制造中，为了节省能量，采用材料为 20 钢、直径为 32mm、壁厚为 4mm 的蛇形管制造，在摩擦焊时，由于管子长达 12m 左右，需要解决长管的平稳旋转、焊接质量稳定和减少内毛刺等问题。表 2-4-4 是蛇形管的焊接参数，焊接过程采用功率极值控制，最后快速停车、快速顶锻。采用上述焊接参数的接头内毛刺小。内外毛刺形状短粗，平整圆滑，抗拉强度达 510~550MPa，全部断在母材上，弯曲角达到 130°。接头的金相组织表明，焊缝区为细晶粒索氏体和铁素体组织，没有发现任何缺陷，提高了接头寿命。用摩擦焊连续焊接了数十万个接头，每批以 3% 抽样进行破坏性检验，质量全部合格。

表 2-4-4 蛇形管的摩擦焊焊接参数（直径 32mm，壁厚 4mm）

转速 /(r/min)	摩擦压力 /MPa	摩擦时间 /s	顶锻压力 /MPa	接头变形量 /mm	备 注
1430	100	0.82	200	2.3~2.4	采用功率极值控制

(5) 石油钻杆的焊接 石油钻杆是石油钻探中的重要工具，它由带螺纹的工具接头与管体焊接而成。工具接头的材料为 35CrMo 钢，管体材料为 40Mn2 钢。常用钻杆的焊接断面为 $\Phi 140\text{mm} \times 20\text{mm}$ 、 $\Phi 27\text{mm} \times 10\text{mm}$ ，由于焊接面积大，焊接管体长，需要采用大型焊机。为了降低摩擦加热功率（特别是峰值功率），需采用表 2-4-5 的弱规范焊接。为消除焊后的内应力，改善焊缝的金属组织和提高接头性能，必须进行焊后热处理。热处理工艺参数选择为 500℃ 回火处理或 850℃ 正火 + 650℃ 回火处理、或者采用 840℃ 淬火 + 650℃ 回火处理，其力学性能见表 2-4-6，摩擦焊制造的石油钻杆如图 2-4-13 所示。

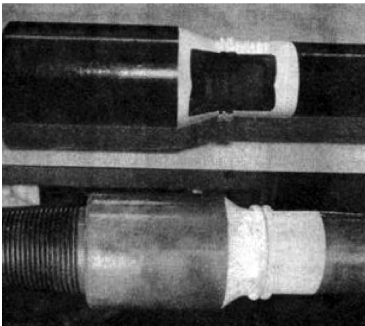


图 2-4-13 摩擦焊石油钻杆

表 2-4-5 石油钻杆的摩擦焊的焊接参数（直径 40mm 和 27mm）

转速 /(r/min)	摩擦压力 /MPa	摩擦时间 /s	顶锻压力 /MPa	接头变形量 /mm	备 注
530	5~6	30~50	12~14	摩擦变形量 12mm 顶锻变形量 8~10mm	钻杆工具接头焊接端面倒角

表 2-4-6 石油钻杆摩擦焊接头力学性能

接头直径 /mm	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	断面收缩率 (%)	冲击韧度 /(J/cm ²)	弯曲角 (°)	焊后热处理工艺
127	770	18.5	69	57	113	500℃ 工频回火
140	697	23.8	66.5	45	96	850℃ 正火 + 650℃ 回火空冷

4.2 搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊在飞机制造、机车车辆和船舶制造中已经得到应用，主要用于铝合金、镁合金、铜

合金、钛合金和铝基复合材料的焊接,钛合金和钢的焊接也有研究。

4.2.1 搅拌摩擦焊的焊接过程

1. 搅拌摩擦焊原理

搅拌摩擦焊(FSW)是英国焊接研究所(简称TWI)于1991年发明的一种用于低熔点合金板材焊接的固态连接技术。它是由摩擦焊派生发展起来的,由于这种工艺能进行板材的对接,并具有固相焊接接头独特的优点,因而在焊接高强度铝合金板材方面获得成功。

搅拌摩擦焊的工作原理如图2-4-14所示,将一个耐高温硬质材料制成的一定形状的搅拌头旋转深入到两被焊接材料连接的边缘处,搅拌头高速旋转,在两焊件连接边缘产生大量的摩擦热,从而在连接处产生金属塑性软化区,该塑性软化区在搅拌头的作用下受到搅拌、挤压,并随着搅拌头的旋转沿焊缝向后流动,形成塑性金属流,并在搅拌头离开后的冷却过程中,受到挤压而形成固相焊接接头。

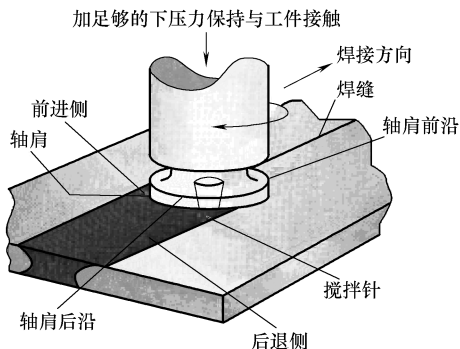


图 2-4-14 搅拌摩擦焊原理示意图

2. 接头形成机理

(1) 接头组织 搅拌摩擦焊时,由于轴肩和焊件上表面紧密接触,因而焊缝通常呈V形,接头一般形成三个组织明显不同的区域(见图2-4-15、图2-4-16)。焊核区(Weld nugget zone,简称WNZ)位于焊缝中心靠近搅拌针扎入的位置,一般由细小的等轴再结晶组织构成。热机影响区(Thermal-mechanically Affected Zone,简称TMAZ)位于焊核区两侧,该区域的材料发生程度较小的变形。第三个是热影响区(Heat-affected Zone,简称HAZ),该区组织在焊接过程中仅受到热循环作用,而未受到搅拌头搅拌作用的影响。不同区域所形成的最终组织与焊接过程中的局部热、机械搅拌的循环历史有关,并且经历了差异较大的塑性流动和热载荷,导致应变、应变率和温度存在较大的差异。

1) 焊核区:焊核区的塑性流动是非对称性的,该区经历了高温、大应变后,焊核的中心发生了强烈的变形。大应变导致焊核区在焊接过程中发生了动态再结晶,铝锂合金的晶粒尺寸一般为 $1\sim4\mu\text{m}$,并导致该区出现高密度的沉淀相,从而有利于抑制焊接过程中晶粒的长大。这些沉淀颗粒的尺寸为 $1\sim3\mu\text{m}$,与亚晶粒的尺寸相似。在焊接过程中,材料与搅拌针之间的相互作用导致焊核区出现同心环(洋葱环组织)。

2) 热机影响区:热机影响区是一个过渡区域,虽然也经历了连续的温度变化和机械搅拌后,但该区的局部应变较焊核区小,明显导致初始拉长晶粒的旋转变形。热机影响区和焊核区间的组织变化没有过渡,变化非常显著。对6061-T651铝合金搅拌摩擦焊接头热机影响区的组织分析表明,该区内的晶界大多为小角晶界。这些晶界是亚晶界,尺寸为 $10\sim20\mu\text{m}$,大部分晶粒内部存在高密度的网状位错。

3) 热影响区:热影响区在焊接过程中经历了沉淀相的溶解、回复、再结晶和晶粒长大,具体发生何种变化与合金种类、合金的初始热处理状态和距焊缝中心的距离有关。热影响区的晶粒尺寸与母材相近,铝合金的平均晶粒尺寸为 $20\sim62\mu\text{m}$,而热影响区的平均晶粒尺寸为 $17\sim60\mu\text{m}$ 。焊缝前进侧和后退侧的热影响区宽度不同,AA6081-T6接头前进侧热影响区的宽度为 $13\sim16\text{mm}$,后退侧热影响区的宽度为 20mm 左右。前进侧和后退侧分别对应于旋转的搅拌头在焊缝方向的切线速度与搅拌头行进方向相同和相反的侧面。

(2) 焊核区组织形成过程 在搅拌摩擦焊过程中,焊核区的形成与搅拌过程中的塑性流动有

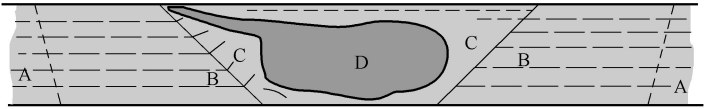


图 2-4-15 搅拌摩擦焊接头

A—母材 B—热影响区 C—热机影响区 D—焊核区

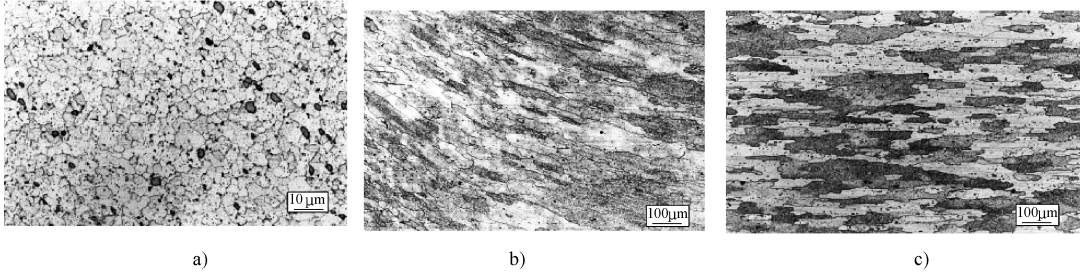


图 2-4-16 搅拌摩擦焊接头各区的金相微观组织

a) 焊核区 b) 热机影响区 c) 热影响区

关，当软化层内的塑性材料发生流动时，其流动质点的速度和方向随位置和时间不断发生变化，因而其流动形式属于非稳态流场。同时，软化层内不同塑性流层间存在速度梯度，由于软化层具有一定的粘度，因而流速不同的流层界面处产生粘性摩擦切应力 f_{ij} 。以软化流层 i 为分析对象（见图 2-4-17a），两侧界面处存在剪应力 $f_{i-1,i}$ 和 $f_{i,i+1}$ ，两作用力的方向相反，从而导致层 i 处的板条状组织受到拉伸而伸长，如图 2-4-17b 所示。由于受到搅拌头的搅拌作用，软化层内板条状组织在伸长的

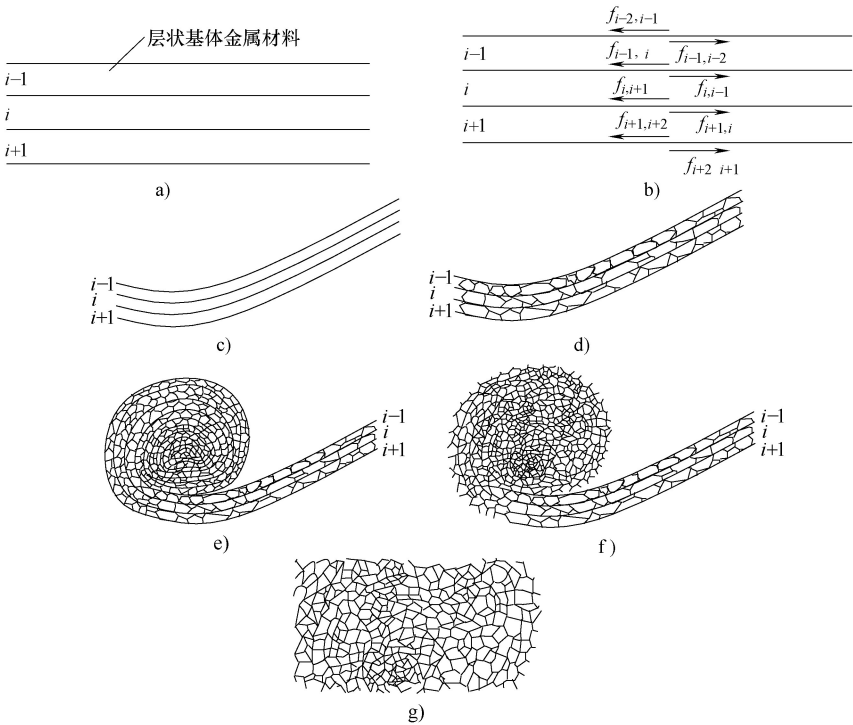


图 2-4-17 焊核区组织形成过程示意图

a) 母材内板条组织 b) 软化材料内形成粘性摩擦剪切力 c) 被拉长、发生弯曲的板条组织 d) 板条组织发生再结晶
e) 弯曲程度较大的再结晶组织 f) 板条晶界消失 g) 无序状排列的再结晶晶粒

同时还发生弯曲变形，如图 2-4-17c 所示。拉长的弯曲板条状组织在热循环作用下发生再结晶而在板条状内形成细小的再结晶晶粒，如图 2-4-17d 所示，再结晶晶粒在整体上仍具有方向性，沿板条取向分布。由于焊缝中部受到搅拌头的强烈搅拌作用，导致发生再结晶的弯曲板条状组织发生更大程度的变形。然而板条组织晶界所能承受的弯曲程度有限，当弯曲程度超过了晶界弯曲上限时，原有的板条状晶界被破坏，导致晶粒间的整体板条状取向不明显，在微观下呈无序状排列，如图 2-4-17e 所示。图 2-4-17f 为晶界被破坏后所形成的组织形貌，局部放大后的再结晶晶粒表现出一种无序、无方向性的特点，如图 2-4-17g 所示。

3. 接头力学性能

(1) 接头硬度分布 搅拌摩擦焊过程中，接头不同区域发生了软化，其软化程度的差异，导致了接头硬度分布呈“W”形，图 2-4-18 为 6063-T5 铝合金搅拌摩擦焊接头的硬度分布，其他型号的铝合金也具有相同的趋势。从图 2-4-18 中可以看出 WNZ/TMAZ 界面两侧的硬度值相差较小；HAZ/TMAZ 界面两侧的硬度值则相差较大。这种硬度差异导致冷却过程中热影响区和热机影响区界面两侧材料的收缩程度不同，即二者的变形协调性较差，因而界面处易形成较大的残留应力集中，导致该区域为整个接头中强度最弱的区域。

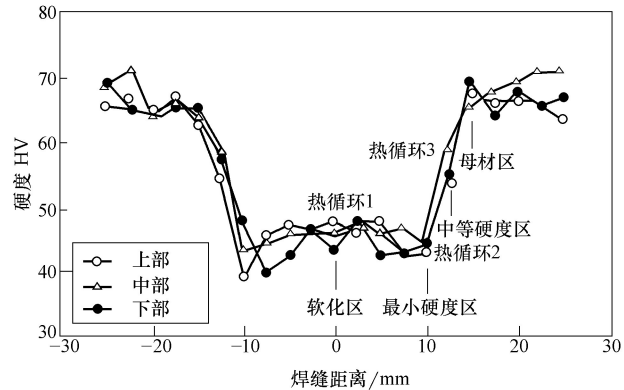


图 2-4-18 6063-T5 铝合金接头的显微硬度分布

(2) 接头强度 从国内外的研究情况来看，目前所开展的 FSW 研究主要集中在铝合金、镁合金以及纯铜等软质、易于成形的材料上，对钛合金、不锈钢、铝基复合材料也有少量研究。从表 2-4-7 可以看出，无论哪种材料，包括难熔焊的硬铝和超硬铝，其 FSW 接头的抗拉强度均能达到母材的 70% 以上。对于 CA06 和 AC4A 铝合金的 FSW，可以得到与母材等强的接头。接头性能的具体数值，除了与母材本身的性能有关外，在很大程度上还取决于 FSW 的焊接参数。

表 2-4-7 FSW 接头/母材的力学性能

母材	抗拉强度(接头/母材)/MPa	屈服强度/MPa	伸长率(%)
2014-T651	326/479	218/422	—
2024-T3	432/497	304/424	7.6/14.9
2024-T351	410/493	268/350	5.1/19
2024-T6	400/477	—/280	—/20.5
5083-O	271/275	125/124	23/24
5005-H14	118/158	73/147	7/7
5083-H321	305/336	153/249	22/16
6013-T6	322/398	292/349	—
6061-T6	199/320	—	11/16
6082-T6	245/317	150/291	5.7/11.3
7020-T6	325/385	242/326	4.5/13.6
7050-T7451	427/558	303/490	5.7/16.7
7075-T6	470/585	—/560	—/12
7075-T651	354/545	263/479	—
AM50	180/215	115/117	4.5/10.5
AM60	198/240	110/130	6.5/13
AZ31	201/288	127/219	3.5/6.5

(续)

母材	抗拉强度(接头/母材)/MPa	屈服强度/MPa	伸长率(%)
AZ61	285/300	100/140	17/25
AZ91	183/250	153/160	1.5/7
Cu	220/250	—	—
6061 + 20% B ₄ C	210/248	137/124	4/12
S355 steel	535/545	342/346	19/31.5
DH36 steel	559/483	469/345	8.6/21
304 steel	740/740	300/280	68/68
HSLA65 steel	654/579	537/537	24/28

4. 搅拌摩擦焊产热

搅拌摩擦焊过程中形成了大量的生成热，这些生成热主要来源于轴肩与焊件材料上表面、搅拌针与接合面间的摩擦热、搅拌针附近材料的塑性变形产生的热，其中摩擦热是焊接产热的主体。随着搅拌头沿焊缝方向行走，这些热量对焊缝及焊缝附近的母材施以热循环作用，导致材料中沉淀相的溶解、焊缝和热影响区发生较程度的软化。通过建立合适的传热模型，可以从理论上预测材料在一定的焊接参数下所经历的热过程，对优化焊接参数、接头形式、获得符合性能要求的接头具有重要作用。

目前，还不能对搅拌摩擦焊的产热进行精确计算，产热机制的解释和计算方法有很多种，某些学者认为在稳定搅拌摩擦焊阶段，搅拌针插入过程的产热可以不考虑，也有人把轴肩、搅拌针的产热分别进行了计算和测量。在热输入和温度分布的计算中，由于搅拌头扎入过程的产热比较复杂，预热结束后的稳定焊接阶段可以不考虑这部分热量，并假设轴肩/焊件界面的热输入是恒定的，在此基础上建立热输入数值模型，并通过试验数据来调节计算的热输入，使计算温度与测量值相匹配。Chen 等人基于 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊过程的产热分析，考虑了轴肩与母材、搅拌头和母材之间的摩擦产热，计算了接头的温度场和残留应力分布，图 2-4-19 是计算结果和测量结果的对比。试验时的焊接速度为 140mm/min、搅拌头旋转速度 500r/min。图 2-4-19a 显示出距离焊缝中心 10mm、距离焊缝上部 1.6mm 位置的温度分布，从图中可知，刚开始焊接时的初始计算温度高于测量温度，经过高温以后，实测温度比计算温度高，这主要是垫板在刚开始焊接时吸收热量，当焊接到一定程度后，由于温度累积降低了散热。图 2-4-19b 是垂直焊接方向的横向温度分布，可以看出，随着焊接速度的增加，焊接温度明显下降。

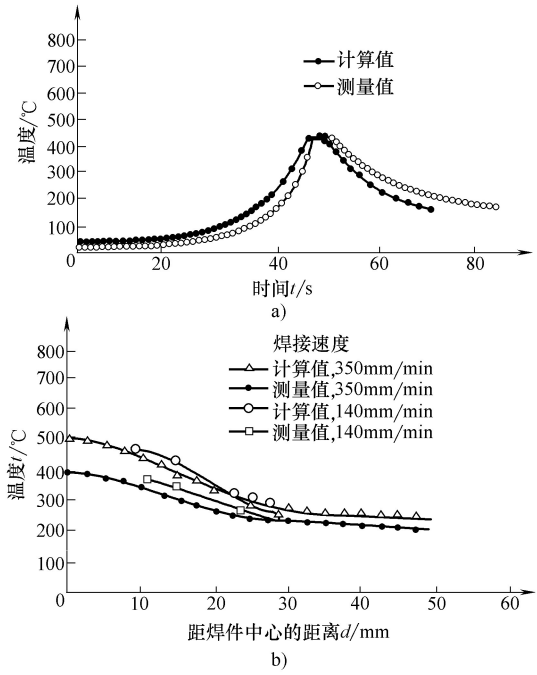


图 2-4-19 6061-T6 铝合金接头的温度分布

4.2.2 搅拌摩擦焊工艺

1. 工艺特点

与传统摩擦焊及其他焊接方法相比，搅拌摩擦焊有以下优点：

1) 焊接接头质量高, 不易产生缺陷。焊缝是在塑性状态下受挤压完成的, 属于固相焊接, 避免了熔焊时熔池凝固过程中产生裂纹、气孔等缺陷, 这对裂纹敏感性强的 7000 系列、2000 系列铝合金的高质量连接十分有利。因焊件刚性固定, 加热温度低, 故焊后不易产生变形。

2) 不受轴类零件的限制, 可进行平板的对接和搭接, 可焊接直焊缝、角焊缝及环焊缝, 可进行大型框架结构及大型筒体制造、大型平板对接等。

3) 便于机械化、自动化操作。质量比较稳定, 重复性高。

4) 焊接成本较低。不用填充材料, 也不用保护气体。厚焊件边缘不用加工坡口。焊接铝材工件不用去氧化膜, 只需去除油污即可。对接允许留一定间隙, 不苛求装配精度。

5) 焊件有刚性固定, 且固相焊时加热温度较低, 故焊件不易变形, 对较薄铝合金结构(如船舱板、小板拼成大板)的焊接极为有利, 这是熔焊方法难以做到的。

6) 安全、无污染、无熔化、无飞溅、无烟尘、无辐射、无噪声、没有严重的电磁干扰及有害物质的产生, 是一种环保型连接方法。

搅拌摩擦焊本身也存在如下缺点:

1) 不同的结构需要不同的工装夹具, 设备的灵活性差。

2) 如不采用专门的搅拌头, 焊接结束后搅拌头退出时在焊缝末端产生凹坑, 需要用其他焊接方法补焊。

3) 目前焊接速度不高。

4) 焊缝背面需要有垫板, 在封闭结构中垫板的取出比较困难。

2. 搅拌摩擦焊接头形式

搅拌摩擦焊可以实现棒材-棒材、管材-管材、板材-板材的可靠连接, 接头形式可以设计为对接、搭接, 可进行直焊缝、角焊缝及环焊缝的焊接(见图 2-4-20)。

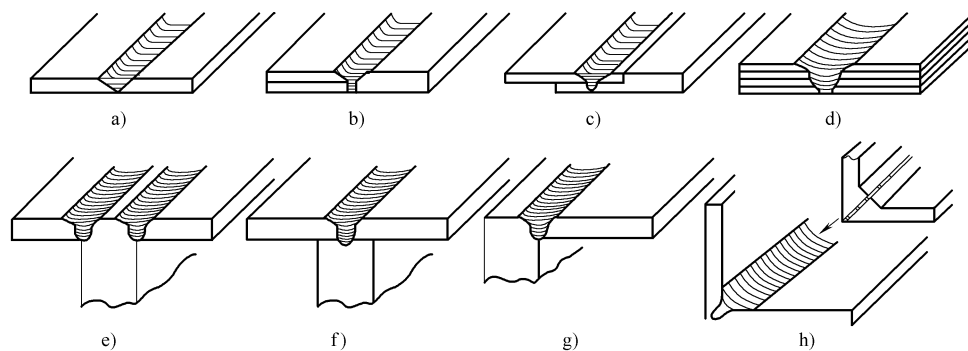


图 2-4-20 摩擦焊接头的基本形式

a) 直口对接 b) 对搭混合 c) 单搭接 d) 多搭接
e) 三片 T 形对接 f) 双片 T 形对接 g) 边缘对接 h) 角接

3. 搅拌摩擦焊焊接参数的选择

搅拌摩擦焊的焊接参数主要包括焊接速度(搅拌头沿焊缝方向的行走速度)、搅拌头转速、搅拌头仰角和轴肩压力。

(1) 焊接速度 图 2-4-21 为焊接速度对铝锂合金搅拌摩擦焊接头抗拉强度的影响。由图 2-4-21 可见, 接头强度随焊接速度的提高并非单调变化, 而是存在峰值。当焊接速度小于 160mm/min 时, 接头强度随焊接速度的提高而增大, 并于 $v = 160\text{mm/min}$ 时达到 381MPa 的最大值。从焊接热输入可知, 当转速为定值, 焊接速度较低时, 搅拌头/焊件界面的整体摩擦热输入较高。如果焊接速度过高, 使塑性软化材料填充搅拌针行走所形成的空腔的能力变弱, 软化材料填充空腔能力不

足,焊缝内易形成一条狭长且平行于焊接方向的疏松孔洞缺陷,严重时焊缝表面形成一条狭长且平行于焊接方向的隧道沟,导致接头强度大幅降低,如 $v = 180\text{mm/min}$ 时,焊核区和热机影响区界面处形成较大的孔洞缺陷,接头强度仅为 336MPa 。

(2) 搅拌头转速 保持焊接速度一定,改变搅拌头旋转速度进行试验,结果表明当旋转速度较低时,不能形成良好的焊缝,搅拌头的后边有一条槽。随着旋转速度的增加,沟槽的宽度减小,当旋转速度提高到一定数值时,焊缝外观良好,内部的孔洞也逐渐消失,在合适的旋转速度下接头获得最佳强度值。

对于高强度铝锂合金,在焊接速度 $v = 160\text{mm/min}$ 、仰角 $\theta = 2^\circ$ 的条件下,搅拌头转速对铝锂合金搅拌摩擦焊接头强度的影响如图2-4-22所示。由该图可见,当 $\omega \leq 800\text{r/min}$ 时,接头强度随着转速的提高而增加,并于 $\omega = 800\text{r/min}$ 时到达最大值;当 $\omega > 800\text{r/min}$ 时,接头强度随着转速的提高而迅速降低。

搅拌头转速也是通过影响焊接热输入和软化材料流动,影响接头微观结构,进而影响接头强度。当焊接速度为定值、转速较低时(如 $\omega = 500\text{r/min}$, $v = 160\text{mm/min}$, $\theta = 2^\circ$),焊接热输入较低,搅拌头前方不能形成足够的软化材料填充搅拌针后方所形成的空腔,焊缝内易形成孔洞缺陷(见图2-4-23a),从而弱化接头强度。转速提高,焊接峰值温度增大,因而在一定范围内提高转速,热输入增加,有利于提高软化材料填充空腔的能力,避免接头内缺陷的形成,如搅拌头转速提高到 $\omega = 800\text{r/min}$ 时,接头内无缺陷(见图2-4-23b)。

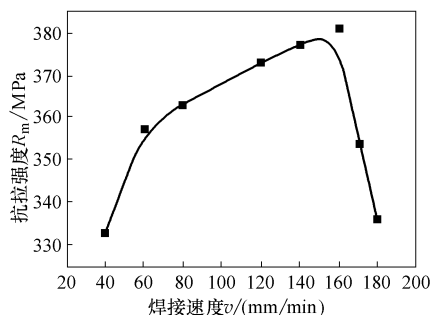


图 2-4-21 焊接速度对铝锂合金搅拌摩擦焊接头抗拉强度的影响
($\omega = 800\text{r/min}$, $\theta = 2^\circ$)

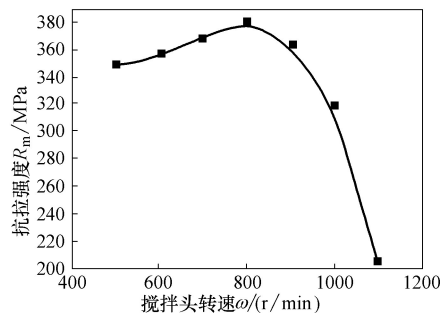


图 2-4-22 搅拌头转速对铝锂合金搅拌摩擦焊接头强度的影响
($v = 160\text{mm/min}$, $\theta = 2^\circ$)

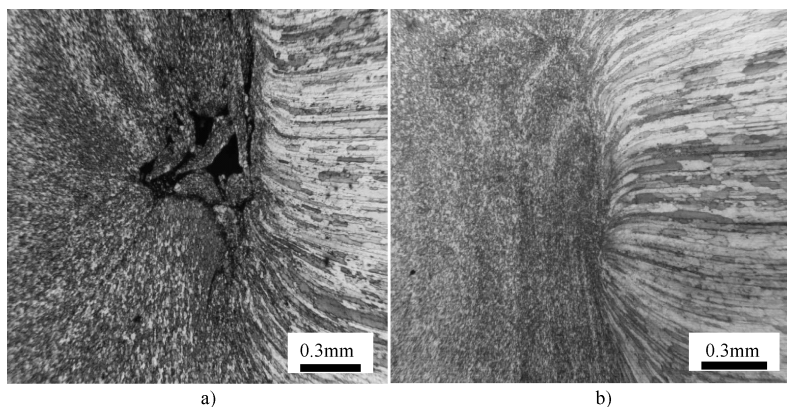


图 2-4-23 搅拌头转速对接头缺陷的影响
($v = 160\text{mm/min}$, $\theta = 2^\circ$)
a) $\omega = 500\text{r/min}$ b) $\omega = 800\text{r/min}$

搅拌头旋转速度和焊接速度的比值对接头性能有一定影响,图 2-4-24 是旋转速度 $\omega = 1000\text{r/min}$ 时,不同 ω/v 比值对抗拉强度的影响,试验材料为含 5% 质量分数 Mg 的铝合金。从图 2-4-24 可知,随着 ω/v 值的增加,强度和塑性都增加,最大值的抗拉强度达到 310MPa,与母材的实测值相同,伸长率为 17%,是母材实测值的 63%。在达到最大强度值后,继续增加 ω/v 的数值,强度和塑性反而下降。

对于 Al-5Mg 合金的搅拌摩擦焊接,当 ω/v 比值一定时,增加旋转速度,接头力学性能有所提高,如图 2-4-25 所示,在 ω/v 比值为 10 时(图 2-4-24 中性能最低的点),随着搅拌头旋转速度的增加,力学性能增加,但当 ω 超过 1300r/min 时,强度增加的速率开始变缓,塑性和转速的增加近似呈线性关系。最佳的抗拉强度为 304MPa,达到母材实测值的 97%,伸长率为 21.4%,是母材实测值的 78%。由此可知,焊接接头性能的高低,除了和 ω/v 比值有关外,还和搅拌头旋转速度的绝对值有关。

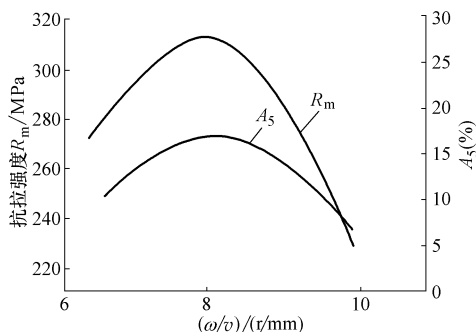


图 2-4-24 ω/v 比值对接头性能的影响
(ω 为 1000r/min 时)

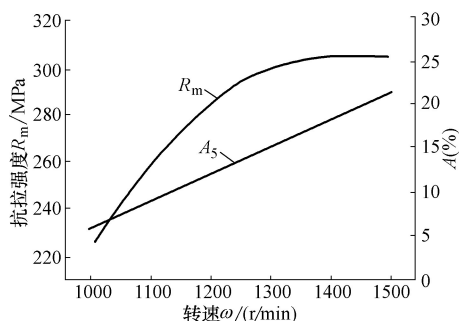


图 2-4-25 搅拌头转速对接头性能的影响
(ω/v 为 10r/mm 时)

(3) 焊接深度 搅拌摩擦焊的焊接深度一般等于搅拌针的长度,对于对接搅拌摩擦焊、搅拌针的长度一般略小于被焊接工件的厚度(一般为板厚的 0.9 倍),如果搅拌针的长度太长,搅拌头就会扎入底部焊接垫板,使搅拌针的寿命缩短,如果搅拌针太短会造成底部材料未焊透,造成焊接缺陷,所以搅拌摩擦焊的焊接深度由搅拌针的长度决定。

(4) 搅拌头的倾斜角度 搅拌摩擦焊时,搅拌头一般会倾斜一个角度(一般 $0^\circ \sim 5^\circ$),倾斜的搅拌头在焊接过程中会转移后的热塑化金属材料施加向前、向下的顶锻力,这个力是保证焊接成功的关键。搅拌头倾斜角度的大小与搅拌头轴肩的大小以及焊接工件的厚度有关。

搅拌摩擦焊时,一般都使搅拌头向后倾斜,以此对焊缝施加压力。所谓搅拌头仰角是指搅拌头与焊接工件法线的夹角,它表示向后倾斜的程度。对于高强铝锂合金,在 $\omega = 800\text{r/min}$ 、 $v = 160\text{mm/min}$ 的条件下,搅拌头仰角对接头力学性能的影响如图 2-4-26 所示。仰角 $\theta = 1^\circ$ 时,接头抗拉强度为 293.3MPa;当 $1^\circ \leq \theta \leq 2^\circ$ 时,接头强度随着仰角的增大而迅速上升;当 $2^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$ 时,接头强度随着仰角的增大呈缓慢上升的趋势, $\theta = 5^\circ$ 时,达到最大值 411MPa;当 $\theta > 5^\circ$ 时,接头强度随着仰角的增大而降低。

仰角主要是通过影响接头致密性、软化材料填充能力、热循环和残余应力来影响接头性能。如果仰角

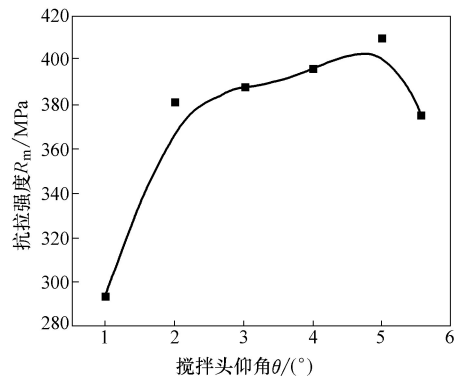


图 2-4-26 搅拌头仰角对接头强度的影响
($\omega = 800\text{r/min}$, $v = 160\text{mm/min}$)

较低，由于轴肩压入量不足，轴肩下方软化材料填充空腔的能力较弱，焊核区/热机影响区界面处易形成孔洞缺陷，导致接头强度较低。同时，仰角增大，搅拌头轴肩和焊件的摩擦力增大，焊接热作用程度增大。

(5) 轴肩压力 轴肩压力除了影响搅拌摩擦产热以外，还对搅拌后的塑性金属施加压紧力，试验表明，轴肩压力主要影响焊缝成形。压紧程度偏小时，热塑性金属“上浮”溢出焊缝表面，焊缝内部则由于缺少金属填充而形成孔洞。如果压紧程度偏大，轴肩与焊件的摩擦力增大，摩擦热容易使轴肩平台发生粘附现象，焊缝两侧出现飞边和毛刺，焊缝中心下凹量较大，不能形成良好的焊接接头。关于压力对接头性能的定量影响，还有待于深入研究。

4.2.3 典型材料的搅拌摩擦焊

1. 铝合金的焊接

铝合金在飞机、汽车、船舶等结构中得到广泛应用，可以减轻结构的重量。利用搅拌摩擦焊技术，可以克服熔焊时产生气孔、裂纹等缺陷，特别是高强铝合金，熔焊的强度系数比较低，采用搅拌摩擦焊可以大大提高接头强度。图 2-4-27 给出了铝合金熔焊和搅拌摩擦焊的焊接性比较，搅拌摩擦焊可以焊接所有系列的铝合金。

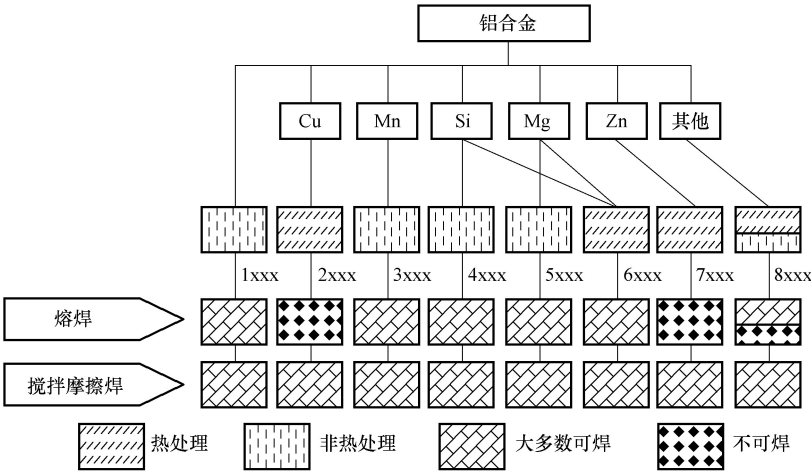


图 2-4-27 铝合金熔焊和搅拌摩擦焊焊接性比较

表 2-4-8 给出了铝合金接头强度及其搅拌摩擦焊接参数。通过研究焊接速度、焊具转速、轴向压力、焊具倾角以及焊具几何参数对接头性能的影响规律，并进行参数优化，可以找到最佳的焊接参数匹配区间。当以这个区间内的参数进行搅拌摩擦焊时，可以获得最佳性能的搅拌摩擦焊接头。

表 2-4-8 铝合金搅拌摩擦焊接头性能及焊接参数

材料	板厚 /mm	焊接参数		
		转速 /(r/min)	焊接速度 /(mm/min)	仰角/(°)
1050	6.3	400	—	—
	5	560 ~ 1840	155	—
1100	3	500	720	3
2017-T351	5	1500	25 ~ 600	—
2024-T6	6.5	400 ~ 1200	60	—
2024-T3	6	—	80	—
	6.4	215 ~ 360	77 ~ 267	—

(续)

材料	板厚 /mm	焊接参数		
		转速 /(r/min)	焊接速度 /(mm/min)	仰角/(°)
2095	1.6	1000	246	—
2195	5.8	200 ~ 250	1.59	—
5052-O	2	2000	40	—
5083	3	—	100 ~ 200	2
	8	—	100	—
		500	70 ~ 200	2.5
5182	1.5	—	100	—
6061-T6	6.3	800	120	—
	6.5	400 ~ 1200	60	—
	4	600	—	—
AA6081-T4	5.8	1000	350	—
6061 铝基复合材料	4	1500	500	—
6082	4	2200 ~ 2500	700 ~ 1400	—
7018-T79	6	—	600	—
7075-T6	4	1000	300	—
7050-T651	6.35	350	15	—
2024	4	2000	37.5	—

2. 镁合金的焊接

目前有文献报道的采用搅拌摩擦焊接方法焊接的镁合金主要有 AZ31、AZ61、AZ91 MB3 等。图 2-4-28 显示出焊接速度对接头强度的影响，同时也显示出相同焊接速度条件下搅拌头转速对接头强度的影响。从图中可知，当旋转速度为 375r/min 时，接头强度随焊接速度的提高先上升后下降，在 150mm/min 的焊接速度时达到强度的最低值。这是由于旋转速度越高，搅拌产热增加，而焊接速度提高，单位长度焊缝的热输入降低，二者的比值决定了接头的实际热输入。实验结果表明，对于厚 2.5mm 的 AZ31 镁合金，最佳焊接参数为：搅拌头旋转速度 900 ~ 1500r/min，焊接速度 95 ~ 150mm/min，接头的最高强度可达 240MPa。

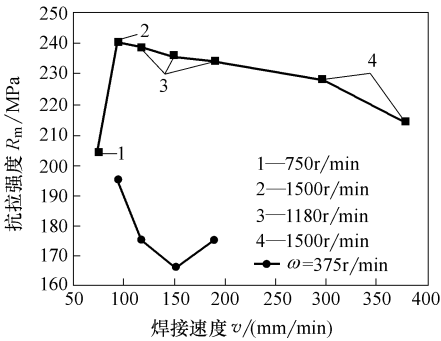


图 2-4-28 焊接速度对接头强度的影响

MB3 镁合金的搅拌摩擦也具有同样的规律，当搅拌头转速过低时，工件不能形成完好的焊缝，在搅拌头后方形成一条沟槽，两试件之间只实现了局部结合，焊缝外观成形不好，内部存在小的空洞和组织疏松，且试样的抗拉强度也低。当旋转速度提高到 1500r/min 以上时，焊缝组织致密，接头强度可以达到母材强度的 90% ~ 98%。当焊接速度变化时，接头强度呈山形变化。对于厚 3mm 的 MB3 镁合金板（抗拉强度 245MPa、伸长率 6%），焊接速度为 25mm/min 时，其强度最低，焊接速度为 48mm/min 时，强度上升到最高值，进一步增加焊接速度到 60mm/min，强度反而下降。金相组织观察可知，焊接速度为 25mm/min 的焊缝存在明显的过热组织，热影响区晶粒长大严重。这是由于在焊接速度较慢的情况下，内部金属晶粒经历了长时高温的缘故。焊接速度为 60mm/min 的焊缝存在微小的空洞或组织疏松，此现象是因为当焊接速度过高时，焊接热输入变低，热塑性软化层厚度小，不足以使焊缝完全闭合的结果。

3. 铜合金的焊接

采用搅拌摩擦焊焊接 Cu 合金，可以消除熔焊时的焊缝成形能力差、热裂倾向大、难于熔合、

未焊透、表面成形差等外观缺陷和焊缝及热影响区热裂纹、气孔等内部缺陷。在轴肩压力基本恒定的条件下,当 $4 < (\omega/v) < 8$ 时,焊缝外观成形良好,焊缝内部无缺陷;当 $\omega/v < 4$ 时,由于单位长度焊缝上的热输入过小,容易产生孔洞等缺陷;当 $\omega/v > 8$ 时,焊接区温度过高,焊缝表面由于过热而氧化成暗褐色。当选用尺寸合适的锥形螺纹形搅拌针时,焊缝成形良好;而选用圆柱形搅拌针时,焊缝容易产生缺陷。这说明螺纹形搅拌针的螺纹槽能改善热塑性材料的流动,从而有利于形成致密的焊缝。图 2-4-29 为铜合金搅拌摩擦焊接头的组织形貌,焊缝中无任何缺陷,接头成形良好,焊核区平均晶粒尺寸约为 $70\mu\text{m}$ (母材的平均晶粒尺寸约为 $100\mu\text{m}$),并有变形孪晶存在。这说明,焊核区晶粒在搅拌摩擦焊中发生了再结晶而得到了细化。接头横截面显微硬度测试结果显示,焊核区的显微硬度低于母材区的显微硬度值,这是由于焊核区发生了再结晶的原因。

试验结果表明,厚 6mm 的 T2 纯铜板,最佳焊接参数为:搅拌头旋转速度 $600 \sim 950\text{r/min}$,焊接速度 $75 \sim 150\text{mm/min}$,接头强度超过 242MPa ,接头的伸长率超过 12%,最高为 14%。

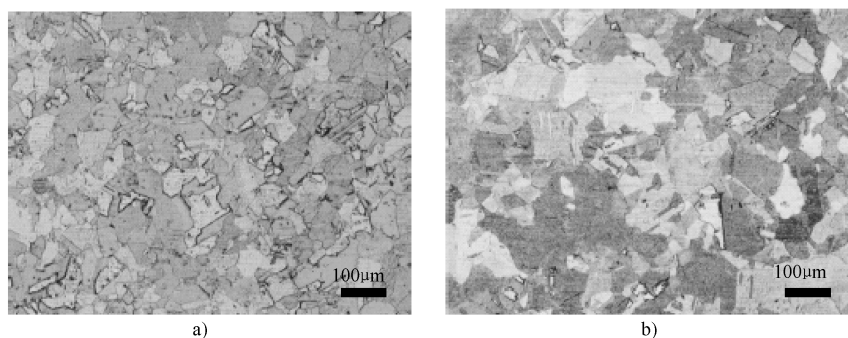


图 2-4-29 铜合金搅拌摩擦焊接头的组织形貌

a) 焊核区 b) 母材区

4. 钛合金的焊接

图 2-4-30 是 Ti-6Al-4V 搅拌摩擦焊后接头各区的微观组织照片。与铝合金搅拌摩擦焊的焊接接头微观组织相比,钛合金搅拌摩擦焊接头明显没有热机影响区。焊核区与热影响区之间没有变形晶粒的过渡。钛合金母材的微观组织由等轴 α 和 $(\alpha + \beta)$ 板条状组织构成 (见图 2-4-30a)。焊核区上部显微组织为等轴 α 晶粒和 $(\alpha + \beta)$ 的小晶团组织构成 (见图 2-4-30b)。并且,等轴 α 晶粒和 $(\alpha + \beta)$ 的尺寸要比母材内的晶粒尺寸小。焊核区中部的微观组织与上部微观组织相近,只是尺寸大一些 (见图 2-4-30c),这可能是因为在焊核区中部散热条件较焊缝上表面差,较长的保温时间,使焊核区中部的组织有时间长大的原因。图 2-4-30d 为焊核区和热影响区交界处的微观组织,该区组织变化较

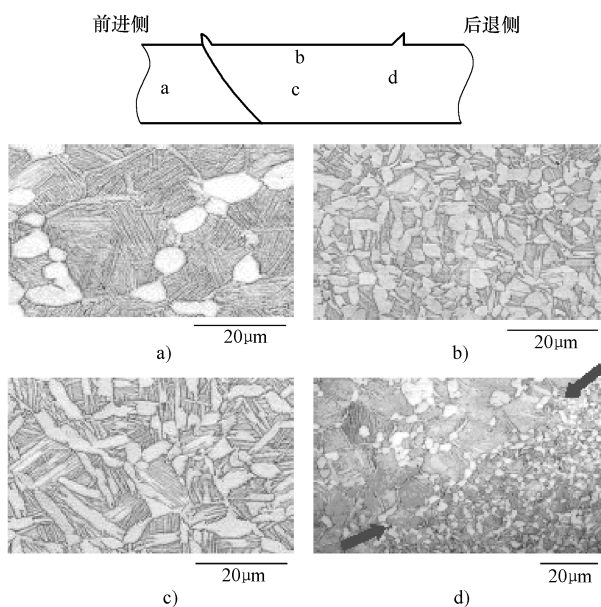


图 2-4-30 钛合金搅拌摩擦焊接头微观组织

a) 母材区 b) 焊核区上部 c) 焊核区中部 d) 过渡区

明显,无过渡,晶粒组织直接从母材较粗大的等轴 α 和 $(\alpha + \beta)$ 板条状变化到焊核区等轴状的 α 和 $(\alpha + \beta)$ 组织。

5. 铝基复合材料的焊接

目前用于搅拌摩擦焊研究的复合材料主要有6061 + Al_2O_3 20%、2014 + Al_2O_3 20%、A359 + SiC20%、6061 + B_4C 20%等。

对铝基复合材料6061 + B_4C 20%的接头微观组织进行分析可知,焊核区的微观组织和母材区的微观组织非常接近。在整个接头上很难区分出焊缝区和母材区。接头的拉伸性能测试结果表明,搅拌摩擦焊接头的力学性能优于TIG焊,并且与母材性能很接近,当母材的增强相分布不均匀时,搅拌摩擦焊接头的强度比母材高。铝基复合材料搅拌摩擦焊时,增强相对搅拌头有较大的摩擦作用,这种磨损使搅拌头产生很大的损耗,损耗的Fe元素最终沉积到焊缝前进侧和焊缝区金属一起形成接头。因此,需要开发耐磨性好的搅拌头。

6. 钢的搅拌摩擦焊

近年来,对钢的搅拌摩擦焊的焊接性研究越来越多。目前可见报道的有DH-36、316L、304L、430、329J4L、HSLA-65和AISI1010等。与铝合金相类似,钢的搅拌摩擦焊接头同样存在焊核区、热机影响区和热影响区。对于平均晶粒尺寸约为22.2 μm 的304奥氏体不锈钢,焊接后的焊核区为等轴晶粒组织,晶粒内部含有一定量的位错,平均晶粒尺寸约为14.1 μm ,比母材区略小。焊核区以外为热机影响区,热机影响区为亚晶组织结构,平均晶粒尺寸约为11.2 μm ,与焊核区相近,约为母材区的一半,焊核区和热机影响区的组织发生了回复和再结晶,这与铝合金的搅拌摩擦焊相类似。

7. 搅拌摩擦焊实例

图2-4-31是搅拌摩擦焊应用的典型例子,图2-4-31a为铜合金管的焊接样件,图2-4-31b为航空航天用铝合金筒体构件的焊接现场,图2-4-31c为板材对接,图2-4-31d为飞机舱门的焊接。

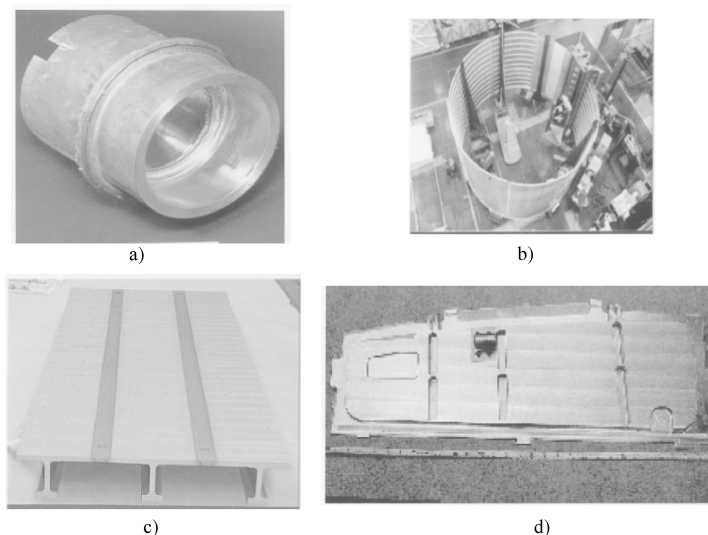


图2-4-31 搅拌摩擦焊实例

a) 铜合金管 b) 铝合金筒体构件 c) 板材对接 d) 飞机舱门

4.2.4 搅拌摩擦焊新技术

近年来,与搅拌摩擦焊有关的新技术及其应用研究比较多,如搅拌摩擦点焊、搅拌摩擦表面改

性技术、细晶材料制备、搅拌摩擦焊修复、搅拌摩擦-激光复合焊接技术和搅拌摩擦焊机器人技术等。

1. 搅拌摩擦点焊

图 2-4-32 为搅拌摩擦点焊原理图，旋转的搅拌头在上部顶锻压力的作用下，压入工件，保持一定的时间后（一般为几秒），将搅拌头回抽提起，完成搅拌摩擦点焊。与传统的点焊方法相比，搅拌摩擦点焊具有变形小、无需进行表面清理、焊具无损耗等特点。既可以实现高质、高效的目标，又可以节约成本。其缺点是焊点部位产生凹坑。

图 2-4-33 为采用搅拌摩擦点焊方法获得的铝合金和高强钢的点焊样件。通过对 2mm 厚 6061-T4 铝合金薄板进行搅拌摩擦点焊研究发现，点焊接头的结合强度不仅与焊接参数有关，而且与搅拌头的形貌尺寸密切相关。焊接时间一般均小于 1s，较少的焊接时间可以提高接合强度。采用搅拌摩擦的方法可以实现高强钢的点焊连接，焊接时间为 3s。而且采用 PCBN 材料制得的搅拌头在点焊了 100 多个焊点后未见明显磨损迹象。

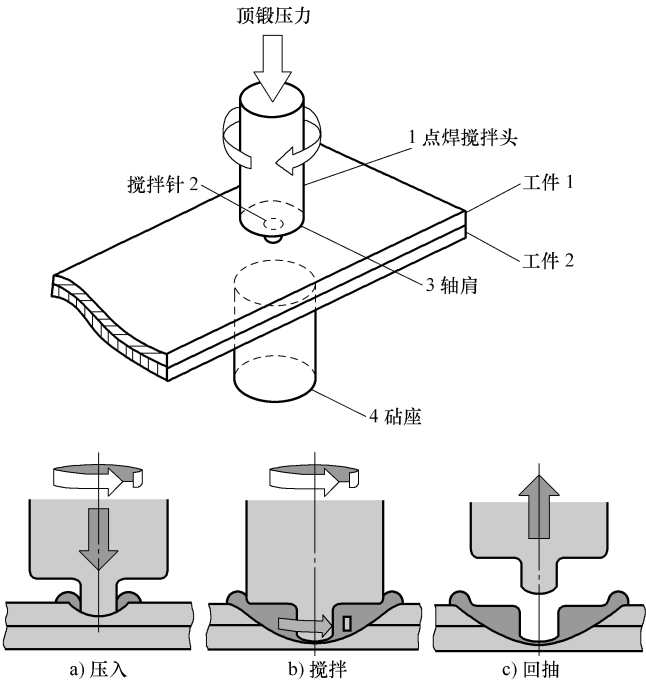


图 2-4-32 搅拌摩擦点焊原理图

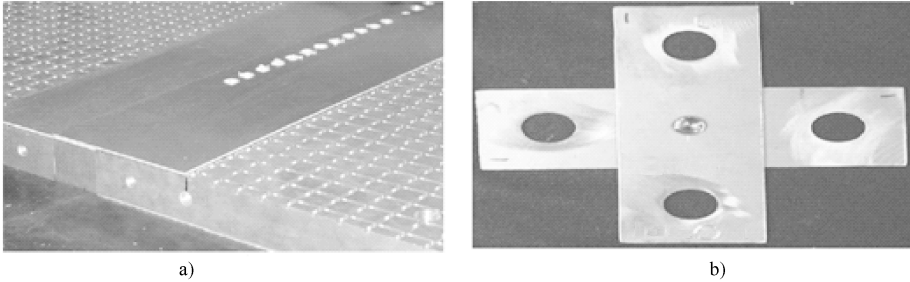


图 2-4-33 搅拌摩擦点焊样件
a) 铝合金 b) 高强度钢

2. 表面改性

(1) 直接表面改性强化 图 2-4-34 为搅拌摩擦焊加工方法实现表面改性的原理图。与搅拌摩擦焊技术相比,用于表面改性的搅拌头只有轴肩而没有搅拌针。这样,搅拌头所经过的区域即形成了一道表面改性层,多道搭接即可实现表面改性的目的。铸造铝合金采用熔焊的方法改性处理时(如激光焊、等离子弧焊、TIG 焊等),会产生晶间液化裂纹、气孔等缺陷。通过搅拌摩擦焊改性工艺处理,不仅可以实现表面改性的目的,而且可以避免由于熔焊所带来的焊接缺陷问题。从铸造铝合金搅拌摩擦焊表面改性后的微观组织可以看出,在基体表面形成了一层改性层。与基体组织相比,改性层的微观组织得到了细化,而且 Si 粒子被打碎而均匀分布在改性层中。

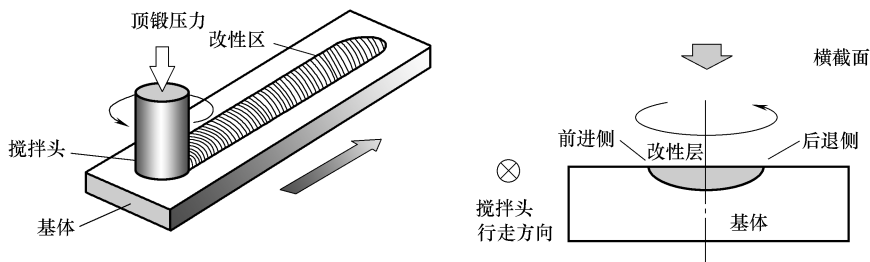


图 2-4-34 搅拌摩擦表面改性原理图

(2) 制备复合材料表面改性层 复合材料具有高强度、高弹性模量、耐磨性好、抗蠕变和抗疲劳性能优异等特点,但由于陶瓷增强相的加入,使得复合材料延展性、韧性显著降低,通过表面改性可以克服此缺点。表面熔化改性的方法无法避免脆性相的生成,使得改性层容易开裂或与母材剥离。搅拌摩擦表面制备复合材料改性层,可以解决这些问题。制备过程是先在 5083 铝合金表面预涂 SiC 粉,然后采用搅拌摩擦加工工艺获得表面为复合材料的改性层。如图 2-4-35 所示, SiC 颗粒在铝基体上分布均匀,而且通过控制预涂粉末的厚度、搅拌摩擦工艺等参数可以获得强化相含量不同的复合材料表面改性层。

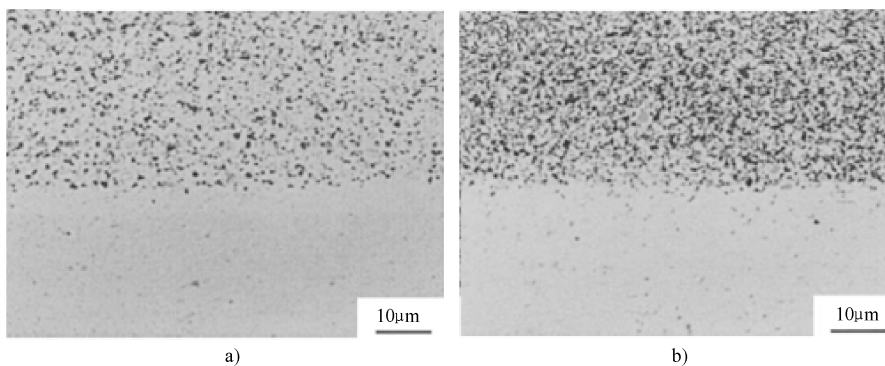


图 2-4-35 搅拌摩擦制备的复合材料表面改性层组织

a) $w(\text{SiC})$ 为 13% b) $w(\text{SiC})$ 为 27%

3. 制造超细晶粒材料

超细晶材料由于具有异常优异的力学性能而受到人们广泛关注,如强度高、韧性好、高温和低温具有超塑性等。超细晶材料制备通常采用强烈塑性变形 (SPD) 和等径弯曲通道变形 (ECAP) 的方法,这两种手段适合于中等强度的材料,而对于难变形、延性差的材料则相对困难,而且也很难获得大面积的超细晶材料。搅拌摩擦焊加工工艺由于在高温下完成,因此可以实现在常温下难变

形材料的细晶制备工艺。另外,通过多道搭接的方法可以制造出大面积的超细晶材料。

对 7075 铝合金采用搅拌摩擦加工处理制备出超细晶材料,晶粒得到了很好的细化,晶粒平均尺寸达到了亚微米级(约 250nm)。图 2-4-36a 是 7075 铝合金的细晶材料微观组织照片,经过搅拌摩擦焊加工工艺处理,原始母材板条状的微观组织转变为细化的等轴晶粒(见图 2-4-36b),等轴晶粒在高温下退火有长大现象(见图 2-4-36c)。图 2-4-37 是对 7075 铝合金母材及超细晶材料在高温下的冲压成形试验结果,母材在冲程为 18.5mm 时已经不能很好地成形。而对于超细晶材料在冲程为 28.5mm 时,仍然成形完好。

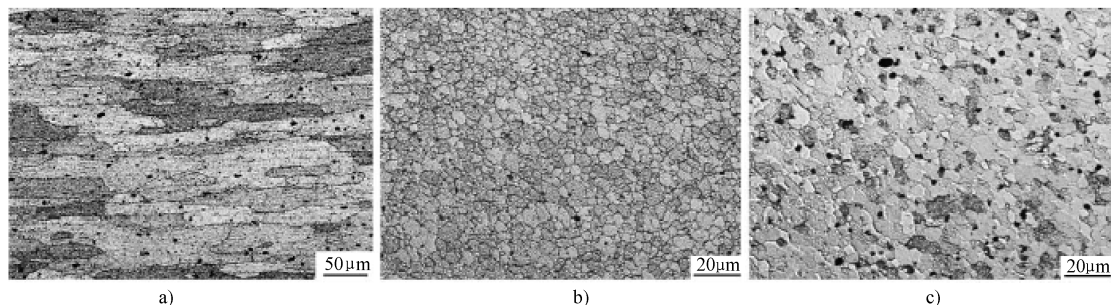


图 2-4-36 7075 铝合金微观组织

a) 母材 b) 搅拌摩擦制备的超细晶材料 c) 超细晶材料 723K 退火 1h

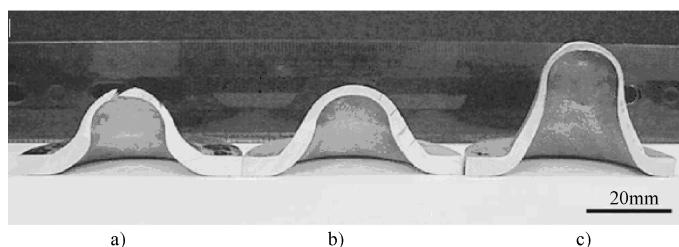


图 2-4-37 7075 铝合金母材及超细晶材料在高温下的冲压成形试验结果

a) 母材冲程 18.5mm b) 细晶材料冲程 18.5mm c) 细晶材料冲程 28.5mm

4. 搅拌摩擦焊修复

通过在原始焊缝上开槽的方式模拟了搅拌摩擦焊的修复过程,首先用尺寸略大于缺口的铝合金塞块对其进行封孔,用相同尺寸的搅拌头对其进行两次修复,两道焊缝中间有一个偏移量。其目的是消除由于塞块的加入产生的两个新界面。通过采用这种两道焊缝搭接的方法,完全可以实现搅拌摩擦焊接头的有效修复。

搅拌摩擦焊修复技术在航空修理领域中有广阔的应用前景,如英国空中客车公司利用该技术,对在役商用客机的机翼蒙皮、裂纹、破孔、缺口、断裂等损伤形式的构件进行修理。

裂纹是航空修理中极为常见的损伤形式,主要发生在蒙皮、发动机叶片等承受交变载荷及应力集中的构件中。传统的修理方法是在裂纹的尖端钻止裂孔、铆接加强片等方法,但这样做降低了构件的性能和使用寿命。搅拌摩擦焊修复技术可消除机翼裂纹修理时的高应力集中,其蒙皮表面需要的首次安全检验时间推迟了 3.5 倍,同时也减少了随后的检验次数。在对框、肋裂纹进行搅拌摩擦焊修理时,通过优化焊接参数,搅拌头沿裂纹方向进行焊接修补,不仅可消除裂纹,而且焊缝力学性能优良,减少了大量铆钉和衬片,消除铆接修补时引起的内应力,提高了修理速度和修理质量,而且不会增加额外的修理重量。

破孔是军用飞机特有的一种损伤形式，当蒙皮出现破孔损伤时，以前主要采用堵盖法、贴补法、胶螺等方进行修补，这些方法均存在不同程度的缺陷。采用搅拌摩擦焊修补时，先将破孔切割成规则形状如圆形、矩形等，然后用搅拌摩擦焊方法焊上一个与破孔形状和尺寸相同的补片，接头形式应采用斜面对接，以免影响飞机的气动性能。

5. 激光辅助搅拌摩擦焊技术

激光辅助搅拌摩擦焊（LAFSW）是最新提出的搅拌摩擦焊技术，在搅拌摩擦焊中，焊接所需的热量来自搅拌头和工件之间的摩擦，需要很大的压力和夹紧力，这就导致了搅拌摩擦焊设备笨重、价格昂贵，搅拌头磨损率高。激光辅助搅拌摩擦焊使用激光作为辅助能源加热工件，可以降低搅拌摩擦焊的焊接成本、同时简化焊接设备。激光辅助搅拌摩擦焊原理图及其说明参见绪论的相关部分，这里不再赘述。

4.3 其他摩擦焊

4.3.1 惯性摩擦焊

1. 惯性摩擦焊原理

图 2-4-38 是惯性摩擦焊示意图，工件的旋转端被夹持在飞轮里，焊接过程开始时，首先将飞轮和工件的旋转端加速到一定的转速，然后飞轮与主电动机脱开，同时，工件的移动端向前移动，工件接触后，开始摩擦加热。在摩擦焊加热过程中，飞轮受摩擦扭矩的制动作用，转速逐渐降低，当转速为零时，焊接过程结束。惯性摩擦焊的飞轮贮存的能量 A 与飞轮转动惯量 J 和飞轮角速度 ω 的关系为

$$A = \frac{J\omega^2}{2} \tag{2-4-12}$$

对实心飞轮

$$J = \frac{GR^2}{2g} \tag{2-4-13}$$

式中 G ——飞轮重量；
 R ——飞轮半径；
 g ——重力加速度；
 A ——飞轮贮存的能量；
 J ——飞轮转动惯量；
 ω ——飞轮角速度。

惯性摩擦焊的主要特点是恒压、变速，它将连续驱动摩擦焊的加热和顶锻结合在一起。在实际生产中，可通过更换飞轮或不同尺寸飞轮的组合而改变飞轮的转动惯量，从而改变加热功率。

2. 惯性摩擦焊焊接参数

对于惯性摩擦焊，在焊接参数选择上与连续驱动摩擦焊有所不同，主要的参数有起始转速、转动惯量和轴向压力。

1) 起始转速：转速具体反映在工件的线速度上，对钢-钢焊件，推荐的速度范围

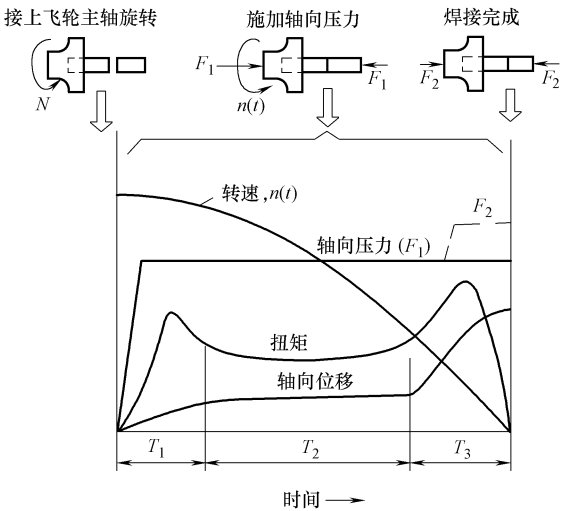


图 2-4-38 惯性摩擦焊原理示意图

为 152 ~ 456m/min。低速（ <91m/min）时，中心加热偏低，飞边粗大不齐，焊缝成漏斗状；中速（91 ~ 273m/min）焊接时，焊缝深度逐渐增加，边界逐渐均匀；如果速度大于 36m/min 时，焊缝中心宽度大于其他部位。

2) 转动惯量：飞轮转动惯量和起始转速均影响焊接能量。在能量相同的情况下，大而转速慢的飞轮产生顶锻变形量较小，而转速快的飞轮产生较大的顶锻变形量。

3) 轴向压力：轴向压力对焊缝深度和形貌的影响几乎与起始转速的影响相反，压力过大时，飞边量增大。

3. 典型材料惯性摩擦焊焊接参数

典型材料和零件的惯性摩擦焊焊接参数见表 2-4-9 和表 2-4-10。

表 2-4-9 典型材料的惯性摩擦焊焊接参数

材料	转速/(r/min)	转动惯量/(kg/m ²)	轴向压力/kN
20 钢	5730	0. 23	69
45 钢	5530	0. 29	83
合金钢 20CrA	5530	0. 27	110
不锈钢 Cr17Ni4Cu3Nb	3820	0. 73	138
超高速钢 40CrNi2SiMoVA	3820	0. 73	18. 6
纯钛	9550	0. 06	20. 7
镍基合金 GH600	4800	0. 60	206. 9
GH4169	2300	2. 89	206. 9
GH901	3060	1. 63	206. 9
GH738	3060	1. 63	206. 9
GH141	2300	2. 89	206. 9
GH3536	2300	2. 89	206. 9
镁合金 MB7	3060 ~ 11500	0. 41 ~ 0. 03	51. 7
镁合金 MB5	3060 ~ 11500	0. 22 ~ 0. 02	40. 0

表 2-4-10 典型零件的惯性摩擦焊焊接参数

材料	形式	工件直径 <i>d</i> /mm	主轴转速 <i>n</i> /(r/min)	轴向压力 <i>F</i> /MPa	总惯量 <i>I</i> /(kg · m ²)	飞轮能量 <i>E</i> /kJ
20 + 20	棒—棒	25	4600	82	0. 282	32. 6
45 + 45	棒—棒	50	2950	211	2. 486	118. 3
微合金钢 + 35	棒—棒	20	2000	133	0. 674	14. 7
40CrMo + 40CrMo	棒—棒	20	2500	159	0. 674	23. 0
K32 + 40Cr	棒—棒	24	2500	350	1. 517	51. 9
12Cr13 + 12Cr13	棒—棒	25	3000	124	0. 844	41. 5
1Cr18Ni9Ti + 1Cr18Ni9Ti	棒—棒	25	3500	124	0. 591	39. 6
1Cr18Ni9Ti + 20	棒—棒	25	300	124	0. 844	41. 5
1Cr18Ni9Ti + 铝合金	棒—棒	25	5500	35	0. 165	27. 2
W6Mo5Cr4V2 + 45	棒—棒	25	3000	276	6. 33	55. 6
钢 + 碳钢	棒—棒	25	800	35	1. 130	20. 7
45 + 45	棒—板	25	1850	19	0. 059	118
40Cr + 45	棒—板	Φ50 × 6	3500	188	6. 33	101. 6
40Mn2 + 40Mn2	管—管	Φ73 × 5	2500	301	2. 486	85
37Mn5 + 37Mn5 (DIN)	管—管	Φ88. 9 × 13	1800	130	20. 48	362

4.3.2 线性摩擦焊

线性摩擦焊原理如图 2-4-39 所示，待焊的两个工件一个固定，另一个以一定的速度做往复运

动,或两个工件做相对往复运动,在压力的作用下,两工件的界面摩擦产生热量,从而实现焊接。该方法的主要优点是无论工件是否对称,均可进行焊接。近年来,线性摩擦焊的研究较多,主要用于飞机发动机涡轮盘和叶片的焊接,还用于大型塑料管道的现场焊接安装。

近年来,随着热硬化性树脂材料的发展,树脂基管道在城市建设、石油化工等领域的应用越来越多,连接问题也比较突出。对于大型管道的现场安装,可采用线性摩擦焊的方法进行焊接。图2-4-40是树脂基管道的线性摩擦焊示意图,采用摆动夹头使待焊界面上下摩擦,当达到可以接合的温度后,停止振动摩擦,施加顶锻压力进行焊接。树脂基管道线性摩擦焊的主要参数是振动频率、振幅和顶锻压力。对于外径216mm、壁厚16mm的管道,振幅可选择1mm左右,振动频率在150Hz以下,接头的拉伸屈服强度可达20MPa以上,几乎和母材等强度,伸长率达到了母材的72%。

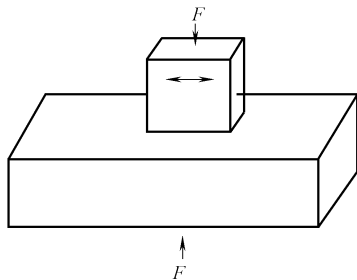


图 2-4-39 线性摩擦焊示意图

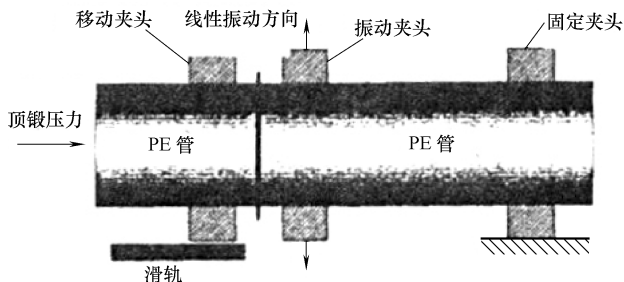


图 2-4-40 树脂基管道的线性摩擦焊示意图

4.3.3 相位摩擦焊

相位摩擦焊主要用于相对位置有要求的工件,如六方钢、八方钢、汽车操纵杆等,要求工件焊后棱边对齐、方向对正或相位满足要求。在实际应用中,主要有机械同步相位摩擦焊、插销配合摩擦焊和同步驱动摩擦焊。

(1) 机械同步相位摩擦焊原理 如图2-4-41所示,焊接前压紧校正凸轮,调整两工件相位并夹持工件,将静止主轴制动后松开并校正凸轮,然后开始进行摩擦焊。摩擦结束时,切断电源并对驱动主轴制动,在主轴接近停止转动前松开制动器,此时立即压紧校正凸轮,工件间的相位得到保证,然后进行顶锻。

(2) 插销配合摩擦焊原理 如图2-4-42所示,相位确定机构由插销、插销孔和控制系统组成。插销位于尾座主轴上,尾座主轴可自由转动,摩擦加热过程中,制动器B将其固定。加热过程结束时,使主轴制动,当计算机检测到主轴进入最后一转时,给出信号,使插销进入插销孔,与此同时,松开尾座主轴的制动器B,使尾座主轴能与主轴一起转动,这样,既可保证相位,又可防止插销进入插销孔时引起冲击。

(3) 同步驱动摩擦焊原理 如图2-4-43所示,采用两个电动机驱动,为了保证工件两端旋转时的相位关系,两主轴通过齿轮、同步杆和花键做同步旋转,在整个焊接过程中两旋转轴保持工件的相位关系不变。

4.3.4 径向摩擦焊

径向摩擦焊的原理如图2-4-44所示,待焊的管子2开有坡口,管内套有心棒,然后装上带有斜面的圆环1,焊接时圆环旋转并向两个管子施加径向摩擦压力 p ,当摩擦加热过程结束时,圆环停止旋转,并向圆环施加顶锻压力 p_0 。由于被焊接的管子本身不转动,管子内部不产生飞边,全部焊接过程大约需要10s,因此主要用于管子的现场装配焊接。

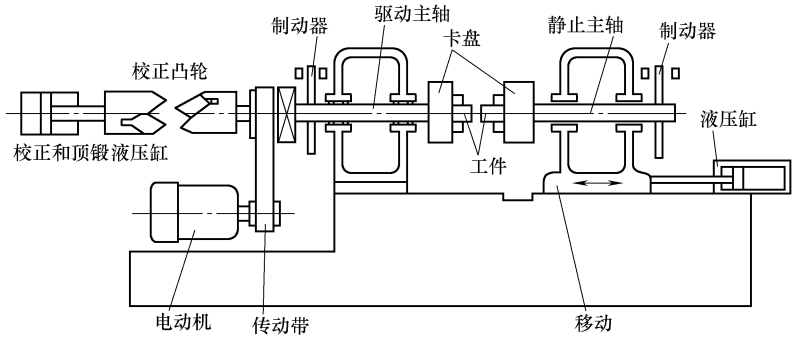


图 2-4-41 机械同步相位摩擦焊示意图

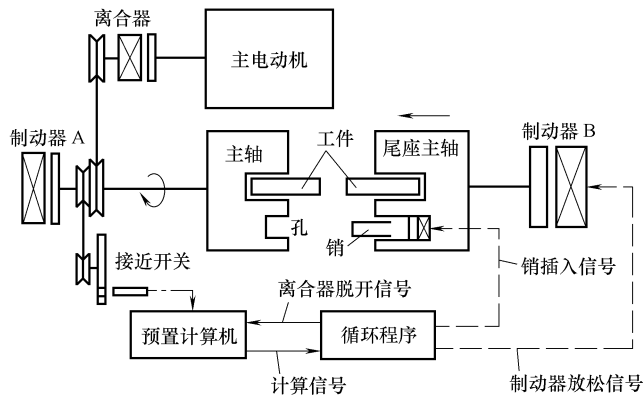


图 2-4-42 插销配合摩擦焊示意图

4.3.5 摩擦堆焊

摩擦堆焊的原理如图 2-4-45 所示。堆焊时，堆焊金属圆棒 1 以转速 n_1 旋转，堆焊件（母材）也同时以转速 n_2 旋转，在压力 p 的作用下，圆棒和母材摩擦生热。由于待堆焊的母材体积大，导热性好，冷却速度快，使堆焊金属过渡到母材上，当母材相对于堆焊金属圆棒转动或移动时形成堆焊焊缝。

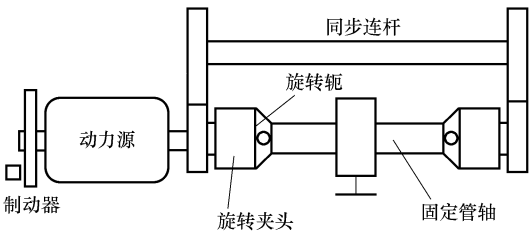


图 2-4-43 同步驱动摩擦焊示意图

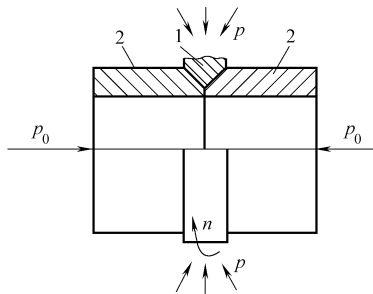


图 2-4-44 径向摩擦焊示意图

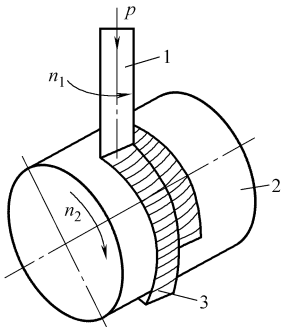


图 2-4-45 摩擦堆焊示意图

1—旋转圆环 2—管子 n —圆环速度 p_0 —轴向压力 p —径向压力

1—堆焊金属圆棒 2—堆焊件 3—堆焊焊缝

4.4 摩擦焊焊接设备及其质量控制

4.4.1 传统摩擦焊焊接设备

摩擦焊的机械化程度较高,焊接质量对设备的依赖性很大,要求设备要有适当的主轴转速,有足够大的主轴电动机功率、轴向压力和夹紧力,还要求设备同轴度好、刚度大。根据生产需要,还需配备如自动送料、卸料、切除飞边等装置。

1. 连续驱动摩擦焊机

(1) 设备组成及要求 普通型连续驱动摩擦焊机主要由主轴系统、加压系统、机身、夹头、检测与控制系统以及辅助装置六部分组成。

1) 主轴系统:主要由主轴电动机、传动带、离合器、制动器、轴承和主轴等组成,主要作用是传送焊接所需要的功率,承受摩擦扭矩。

2) 加压系统:主要包括加压机构和受力机构。加压机构的核心是液压系统,液压系统分为夹紧油路、滑台快进油路、滑台工进油路、顶锻保压油路以及滑台快退油路五个部分。夹紧油路主要通过离合器的压紧与松开完成主轴的起动、制动以及工件的夹紧、松开等任务。当工件装夹完成之后,滑台快进;为了避免两工件发生撞击,当接近到一定程度时,通过油路的切换,滑台由快进转变为工进。工件摩擦时,提供摩擦压力,依靠顶锻回路调节顶端力和顶锻速度的大小;当顶锻保压结束后,又通过油路的切换实现滑台快退,达到原位后停止运动,一个焊接循环结束。

受力机构的作用是平衡轴向力(摩擦压力、顶锻压力)和摩擦扭矩以及防止焊机变形,保持主轴系统和加压系统的同轴度。扭矩的平衡常用装在机身上的导轨来实现。轴向力的平衡可采用单拉杆或双拉杆结构,即以工件为中心在机身中心位置设置单拉杆或以工件为中心对称设置双拉杆。

3) 机身:机身一般为卧式,少数为立式。为防止变形和振动,机身应有足够的强度和刚度。主轴箱、导轨、拉杆、夹头都装在机身上。

4) 夹头:夹头分为旋转和固定两种。旋转夹头又有自定心弹簧夹头和三爪夹头之分,弹簧夹头适宜于直径变化不大的工件,三爪夹头适宜于直径变化较大的工件。为了使夹持牢靠,不出现打滑旋转、后退、振动等,夹头与工件的接触部分硬度要高、耐磨性要好。

5) 检测与控制系统:参数检测主要涉及时间(摩擦时间、刹车时间、顶锻上升时间、顶锻维持时间)、加热功率、摩擦压力(一次压力和二次压力)、顶锻压力、变形量、扭矩、转速、温度、特征信号(如摩擦开始时刻、功率峰值及所对应的时刻)等。

控制系统包括程序控制和参数控制,程序控制用来完成上料、夹紧、滑台快进、滑台工进、主轴旋转、摩擦加热、离合器松开、刹车、顶锻保证、车除飞边、滑台后退、工件退出等顺序动作及其联锁保护等。焊接参数控制则根据方案进行相应的诸如时间控制、功率峰值控制、变形量控制、温度控制、变参数复合控制等。

6) 辅助装置:主要包括自动送料、卸料,以及自动切除飞边装置等。

(2) 典型设备的技术参数 表 2-4-11 和表 2-4-12 是部分国内连续驱动摩擦焊机和混合式摩擦焊机的型号及技术指标,表 2-4-13 是部分国外厂家的设备型号及主要技术指标。

2. 惯性摩擦焊机

惯性摩擦焊机由电动机、主轴、飞轮、夹盘、移动夹具、液压缸等组成。表 2-4-14 是美国 MIT 公司惯性摩擦焊机的型号和技术指标。这些焊机可以有不同的组合和改动,所有焊机均可配备自动装卸装置、除飞边装置和质量控制检测器,转速均可由 0 调节到最大。

表 2-4-11 连续驱动摩擦焊机型号及技术指标

产品 型号	主要技术参数					
	顶锻力/kN	焊接直径/mm	旋转夹具夹持 焊件长度/mm	移动夹具夹持 焊件长度/mm	转速 /(r/min)	功率 /kW
MCH-2 型	320	15 ~ 50	60 ~ 450	120	1300	37
MCH-4 型	20 ~ 40	4 ~ 16	20 ~ 300	100 ~ 500	2500	11
MCH-20B	200	10 ~ 35	50 ~ 300	80 ~ 450	1800	18.5
MCH-63 型	630	35 ~ 65	100 ~ 380	250 ~ 1400	1200	55
C-0.5A ^①	5	4 ~ 6.5	—	—	6000	—
C-1A	10	4.5 ~ 8	—	—	5000	—
C-2.5D	25	6.5 ~ 10	—	—	3000	—
C-4D	40	8 ~ 14	—	—	2500	—
C-4C	40	8 ~ 14	—	—	2500	—
C-12A-3	120	10 ~ 30	—	—	1000	—
C-20	200	12 ~ 34	—	—	2000	—
C-20A-3	250	18 ~ 40	—	—	1350	—
C-50A	500	30 ~ 50	—	—	1000	—
C63	630	35 ~ 60	—	—	950	—
C-80A	800	40 ~ 75	—	—	850	—
C-120	1200	50 ~ 85	—	—	580	—
CG-6.3	63	8 ~ 20	—	—	5000	—
CT-25	250	18 ~ 40	—	—	5000	—
RS45	450	20 ~ 70	—	—	1500	—

注：A、B、C、D 为机型序号。

表 2-4-12 混合式摩擦焊机型号及技术指标

型号 可焊焊件规格		HAMM- (轴向推力/kN)						
		50	100	150	280	400	800	1200
低碳钢 焊接最大 直径/mm	空心管	φ20 × 4	φ38 × 4	φ43 × 5	φ75 × 6	φ90 × 10	φ110 × 10	φ140 × 16
	实心棒	φ18	φ25	φ30	φ45	φ55	φ80	φ95
焊件长度 /mm	旋转夹具	50 ~ 140	55 ~ 200	50 ~ 200	50 ~ 300	50 ~ 300	80 ~ 300	100 ~ 500
	移动夹具	100 ~ 500	100-不限	100-不限	100-不限	120-不限	300-不限	200-不限

表 2-4-13 部分国外厂家的设备型号及主要技术指标

生产厂家	产品型号	主要技术参数			
		主轴转速/(r/min)	最大轴向力/lbf	焊接直径 /in	最大管面积 /in ²
FPE & Gatwick Fusion Ltd	Modular NC-4000	—	—	—	—
	Modular 7000	—	—	—	—
	Compact 25	—	—	—	—
Manufacturing Tech, Inc.	Model 40	—	—	—	—
	Model 2000	—	—	—	—
Inertia Friction Welding, Inc	7.5ton	3000	15000	1.0	1.0
	10ton	3000	20000	1.125	1.4
	15ton	2400	30000	1.5	2.0
	30ton	2400	60000	1.875	4.0
	60ton	1500	120000	2.375	8.0
	100ton	1000	200000	3.5	14.0
	125ton	1000	250000	4.0	17.0
	150ton	1000	300000	4.5	20.0
ETA	FW 10/250	—	—	—	—

注：1lbf = 4.44822N；1in = 25.4mm。

表 2-4-14 惯性摩擦焊机的型号和技术规格

型号	最大转速 /(r/min) (转速可调)	最大飞轮 /lb · ft ² (kg · m ²)	最大焊接力 /lbf (kN)	最大管形焊缝面积 /in ² (mm ²)	变型
40	45000/60000	0.015 (0.00063)	500 (222)	0.07 (45.2)	B, D, V
60	12000/24000	2.25 (0.094)	9000 (40.03)	66 (426)	B, BX, D, V
90	12000	50 (0.21)	13000 (57.82)	1.0 (645)	B, BX, D, T, V
120	8000	25 (0.21)	28000 (124.54)	1.7 (1097)	B, BX, D, T, V
150	8000	50 (2.11)	50000 (222.4)	2.6 (1677)	B, BX, T, V
180	8000	100 (42)	80000 (355.8)	4.6 (2968)	B, BX, T, V
220	6000	600 (25.3)	130000 (578.2)	6.5 (4194)	B, BX, T, V
250	4000	2500 (105.4)	200000 (889.6)	10 (6452)	B, BX, T, V
300	3000	5000 (210)	250000 (1112.0)	12 (7742)	B, BX
320	2000	10000 (421)	350000 (1556.8)	18 (11613)	B, BX
400	2000	25000 (1054)	600000 (2668.8)	30 (19355)	B, BX
480	1000	250000 (10535)	850000 (3780.8)	42 (27097)	B, BX
750	1000	100000 (21070)	1500000 (6672.0)	75 (48387)	B, BX
800	500	1000000 (42140)	4500000 (20000)	225 (145160)	B, BX

注：1lb · ft² = 0.0421401kg · m²/s；1lbf = 4.44822N；1in = 25.4mm。

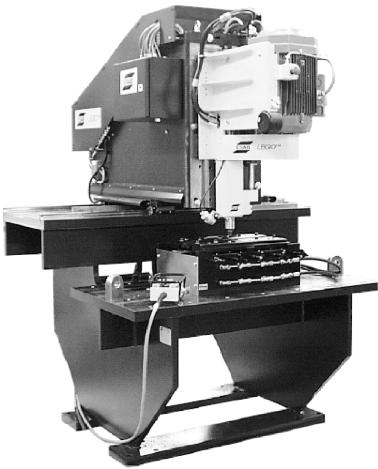
4.4.2 搅拌摩擦焊焊接设备

搅拌摩擦焊焊接设备的种类很多，从设备功能结构上，可以把搅拌摩擦焊机分为搅拌头、机械转动部分、行走部分、控制部分等。

2002 年，英国焊接研究所（TWI）拥有了大尺寸的龙门式搅拌摩擦焊设备，该设备的焊接范围为 8m（长）×5m（宽）×1m（高）。瑞典 ESAB 公司为挪威一家公司设计制造了一台商业用搅拌摩擦焊设备，可以焊接 16m 长的焊缝，此设备已经通过挪威船社的验收，投入使用。挪威这家公司从 1996 ~ 1999 年已经成功焊接了 1700 块船舶面板，焊缝总长度超过 110km。2003 年 5 月，中国设计制造了型号为 FSW-1DB-001 型搅拌摩擦焊设备，可以焊接厚度为 25mm 的铝合金、镁合金，15mm 的铜合金以及 10mm 的钛合金材料，可以焊接 1.5m 长的纵缝和直径 2m 的筒形件。

1. 常用搅拌摩擦焊焊接设备

常用的搅拌摩擦焊焊接设备大致可以分为悬臂式、C 型和龙门式三大类型。悬臂式搅拌摩擦焊焊接设备如图 2-4-46 所示，根据型号不同，可以焊接 1 ~ 5mm、3 ~ 10mm、3 ~ 15mm 和 3 ~ 20mm 厚铝合金或镁合金。焊件直径 2.2m 以下，长度不超过 15m，控制方式为 3 轴数控。C 型搅拌摩擦焊焊接设备一般焊接厚度 10mm 以下的铝合金或镁合金，焊缝形式为纵向直缝、T 形焊缝和环焊缝。龙门式搅拌摩擦焊焊接设备主要用于大型构件、大厚度材料的焊接，是生产中应用最多的一种。表 2-4-15 是部分搅拌摩擦焊焊接设备的主要型号与技术参数。



2. 数控 FSW 焊接设备

这种设备不同于传统的三维刚性控制机械，它利用了六脚昆虫原理，由 6 个支架组成，每个支架都可以改变长度。在负载、刚度和再现性等方面都比传统的搅拌摩擦焊设备有优势。设备的主轴固定在一个框架上，可以使 6 个支架都能自由移动，用来高速焊接一些航空构件，设备的工作空间为 1.2m × 1.2m × 1.2m。

图 2-4-46 悬臂式搅拌摩擦焊焊接设备

表 2-4-15 搅拌摩擦焊设备的主要型号与参数

型号	主要技术参数					
	转速/(r/min)	焊接速度 /(mm/min)	下压力 /kN	焊接距离 /mm	最大功率/kW	焊接厚度/mm
FSW 5UT	—	2000	100	1000	22	35
FSW 5U	—	2000	100	1000	22	35
FSW 6UT	—	2000	25	1000	45	60
FSW 6U	—	2000	150	1000	45	60
P-stir315	2000	10000	50	1000	15	—
DB 系列	—	500	—	2200	—	20
C 系列	—	1200	—	—	—	15
LM 系列	—	800	—	1500	—	20

3. 搅拌摩擦焊机器人

为了实现三维空间曲线的搅拌摩擦焊接，增加焊接适应性，研制了图 2-4-47 的搅拌摩擦焊机器人，可以实现空间焊缝的焊接。

4. 搅拌头

搅拌头是搅拌摩擦焊的关键零件，主要由轴肩和搅拌针两部分构成，如图 2-4-48 所示，上部较细的部分为搅拌针（也称搅拌棒），可以具有多种类型，其几何形貌和尺寸不仅决定着焊接过程的热输入方式和焊接质量及效率，还影响焊接过程中搅拌头附近塑性软化材料的流动形式。

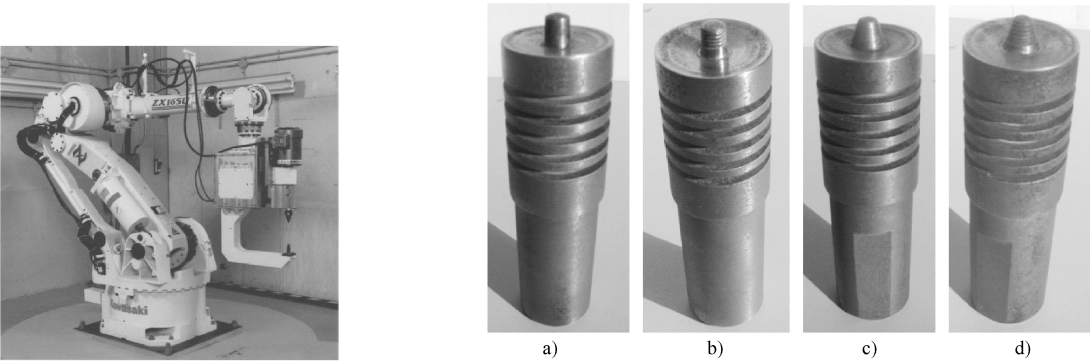


图 2-4-47 搅拌摩擦焊机器人

图 2-4-48 搅拌头

a) 柱形光面 b) 柱形螺纹面 c) 锥形光面 d) 锥形螺纹面

(1) 轴肩 轴肩在焊接过程中通过与工件表面间的摩擦提供焊接热源，并形成一個封闭的焊接环境，以阻止高塑性软化材料从轴肩溢出。常见的轴肩形式是在搅拌针和轴肩的交界处中间凹入。在焊接过程中，这种设计形式可保证轴肩端部下方的软化材料受到向内的作用力，从而有利于将轴肩端部下方的软化材料收集到轴肩端面的中心，以填充搅拌针后方所形成的空腔，同时可减少焊接过程中搅拌头内部的应力集中。

(2) 搅拌针 搅拌针主要有锥形螺纹搅拌针、三槽锥形螺纹搅拌针、偏心圆搅拌针、偏心圆螺纹搅拌针和非对称搅拌针、柱形光头和柱形螺纹搅拌针、可伸缩搅拌针等多种形式。

锥形螺纹搅拌针（Whorl™）和三槽锥形螺纹搅拌针（MX-Triflute™）是英国焊接研究所淘汰柱形搅拌针后设计出的两种搅拌针形貌。它们的共同之处是呈平截头体状（或玻璃杯状），而且都带有螺纹。根据计算，锥形螺纹搅拌针所切削的材料只有柱形搅拌针的 60%，而三槽锥形螺纹搅拌针所切削的材料也只有柱形的 70%。另外，搅拌针上的螺纹能促进搅拌头附近的塑性软化材料具有向上运动的趋势。为了改善软化材料的流动路径，增强其流动行为，还在搅拌针上设计出平台

或沟槽,如图 2-4-49 所示。对于三槽锥形螺纹搅拌针,锥面上开有三个螺旋形的槽,以减小搅拌针的体积,增加软化材料的流动性,可以焊接较厚的材料,同时破坏并分散附着于工件表面上的氧化物。

偏心圆搅拌针 (Trivex™) 和偏心圆螺纹搅拌针 (MX-Trivex™) 的外形是根据搅拌摩擦焊的动态模拟得出的 (见图 2-4-50)。计算结果表明,当搅拌针最小的纵截面与搅拌针旋转起来扫过的

纵截面积比在 70% ~ 80% 之间时,焊接方向的压力最小。偏心圆螺纹搅拌针与偏心圆搅拌针相比,由于包含螺纹,从而更有利于粉碎工件表面上的氧化膜,有利于获得高强度的接头。

非对称搅拌针 (Skew-stir™) 与传统搅拌针差异较大,搅拌针中心轴与设备的中心轴存在一个偏角。采用非对称搅拌针焊接可提高搅拌针周围塑性软化区的范围,同时这种搅拌针的搅拌动作可以提高搅拌针的动态与静态体积比。

可伸缩式搅拌针可分为手动伸缩式搅拌针和自动伸缩式搅拌针。手动伸缩式搅拌针可以通过调节针长来焊接不同厚度的材料和实现变厚度板材间的连接。自动伸缩式搅拌针不仅具有手动伸缩搅拌针的功能,还可在焊接即将结束时将搅拌针逐渐缩回到轴肩内,从而避免形成匙孔缺陷。

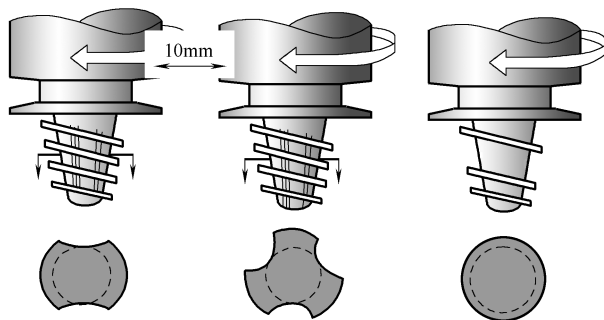


图 2-4-49 锥形螺纹搅拌头

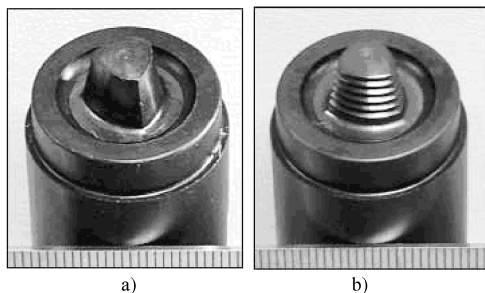


图 2-4-50 偏心搅拌针

a) 偏心圆 b) 偏心圆螺纹搅拌针

参考文献

- [1] 赵嘉华, 冯吉才. 压焊方法及设备 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册: 第 1 卷 焊接方法及设备 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [3] 中国机械工程学会, 中国材料研究学会. 中国材料工程大典: 第 22 卷 材料焊接工程 (上) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [4] 王敏. 材料成形设备及自动化 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [5] 中国机械工程学会焊接分会. 焊接词典 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [6] 中国机械工业标准汇编: 焊接与切割卷 (上) [M]. 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [7] 成都电焊机研究所. 焊接设备选用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [8] 北京. 埃森焊接与切割展览会. 展会综合技术报告 [R]. 北京: 第十五届北京. 埃森焊接与切割展览会组委会, 2010.
- [9] 梁国红, 郭德伦, 关桥, 等. 飞机制造工业中的搅拌摩擦焊研究 [J]. 航空制造技术. 2002, (10): 43-46.
- [10] 王大勇, 冯吉才, 王攀峰. 搅拌摩擦焊接 Al-Li 合金接头组织及力学性能 [J]. 金属学报. 2004, 40 (5): 504-508.
- [11] 冯吉才, 王大勇, 王攀峰. 锥形光头搅拌针搅拌摩擦焊接铝锂合金接头组织及力学性能 [J]. 中国机械工程学报. 2004, 15 (10): 932-935.

-
- [12] 张华, 林三宝, 吴林, 等. AZ31 镁合金摩擦焊接接头力学性能. 焊接学报 [J]. 2003, 24 (5): 65-68.
- [13] 肖兵, 柯黎明, 王伟兰. 纯铜的搅拌摩擦焊接头性能测试与组织分析 [J]. 电焊机. 2004, (增刊): 125-129.
- [14] Takeshi Shinoda, Mika Kawai. Surface modification by novel friction thermomechanical process of aluminum alloy castings [J]. Surface and Coatings Technology. 2003, (169-170): 456-459.

第 5 章 其他压焊方法

5.1 高频焊

高频焊（High-Frequency Welding, HFW）这里主要指高频电阻焊（High-Frequency Resistance Welding, HFRW），即利用 10 ~ 500kHz 的高频电流进行焊接的方法，又称高频对接缝焊。主要应用在机械化或自动化程度较高的管材、型材生产线中，其焊接速度可高达 200m/min。焊件材质可为钢、有色金属，管径 6 ~ 1420mm、壁厚 0.15 ~ 20mm。小径管多为直焊缝，大径管多为螺旋焊缝。

5.1.1 高频焊的基本原理

1. 高频焊的基本类型

根据高频电能导入方式，高频焊可分为高频电阻焊和高频感应焊两类。

（1）高频电阻焊 带材成形为管坯并在挤压辊作用下，使对口两端面呈 V 形，即构成 V 形焊接区，V 形顶点称汇合点。高频电阻焊时电流从电极直接输入（图 2-5-1a），由于趋肤效应和邻近效应的作用，使电流主要集中于 V 形焊接区端面表层，并在邻近汇合点处电流密度最大，因而焊透性极好。同时，为集中 V 形回路磁场、增大管坯内表面感抗而减小分流（沿管坯内、外圆周表面构成两个分流回路），需在管坯内安置铁氧体磁心阻抗器。

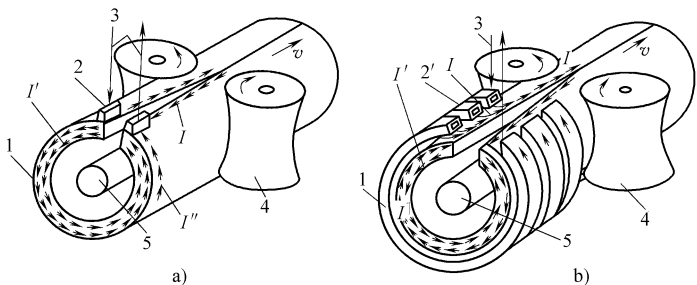


图 2-5-1 高频焊原理

a) 高频电阻焊 b) 高频感应焊

1—管坯 2—电极 2'—感应器 3—接高频电源 4—挤压辊 5—阻抗器

I —焊接电流 I' 、 I'' —分流 v —焊接速度

（2）高频感应焊 焊接时，感应器通过高频电流而在管坯中产生高频感应电流，可分为两部分：其中流过 V 形焊接区者即为焊接电流 I ；另一部分 I' 则从管坯外周表面流向内周表面形成循环电流（图 2-5-1b）并引起较大的能量损失。同理，在管坯内需安置一种成组的簇氏阻抗器（铝质集管）。

2. 高频焊的加热特点

（1）高频焊的热源 高频焊接电流 I 流过 V 形焊接区所析出的电阻热，即是高频焊的热源。

（2）焊接区的温度分布 V 形焊接区如图 2-5-2 所示。其中① ~ ⑤为加热区间；⑤ ~ ⑦（或⑧）为挤压顶锻区间。在加热区间沿管坯中层面 y 方向（即加热深度方向）温度分布如图 2-5-3 所

示。图中曲线表明,由于趋肤效应和邻近效应的强烈作用,越靠近对口端面表层电流密度越大,加热强度越大,因而该处温度也越高;在加热区间沿指向汇合点方向的不同位置上(中层面 x 方向上)温度分布如图2-5-4a所示,图中曲线表明,由于管坯对口端面形成V形回路使邻近效应逐渐加强,电流密度逐渐增大而使加热强度增大,因而该位置上温度也增高,加热深度也增大。汇合点及其邻近区域温度已超过金属熔点形成液态金属层,此时往往出现连续喷射的细滴火花——闪光(与连续闪光焊时的闪光相似,但较弱),这就使接头处获得了需要的焊接温度,为挤压顶锻焊接创造了条件。应该指出,管坯对接接头沿厚度加热温度是否均匀,即管坯对接接头内、外圆周表面温度是否达到相同,将直接影响焊接质量。同时,管坯对接接头形成焊缝前的每一点的温度变化,实际上都要经历加热区间中①~⑤各位置所处的温度。

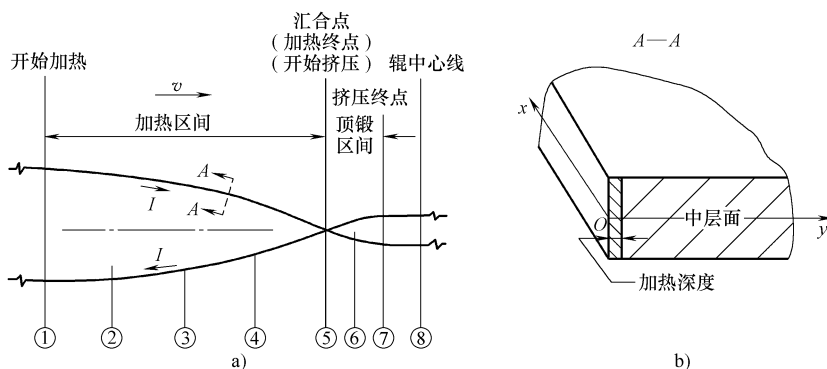


图 2-5-2 高频焊接区示意图

3. 挤压顶锻焊接

挤压顶锻区间的温度分布如图2-5-4b所示。此时,在挤压辊产生的挤压力(焊接压力)作用下,将熔化金属及氧化夹杂挤出,并使接头处受到强烈顶锻(管坯周长挤去一定挤压力),促使形成共同晶粒获得牢固对接接头。其实质仍属于塑性状态下的固相焊接。

5.1.2 高频焊的一般工艺

1. 高频焊的主要特点

(1) 高频焊主要特点

1) 焊接速度高:这是由于电能高度集中,焊接区加热速度极快,焊接速度高达150~200m/min时仍不会产生“跳焊”现象。

2) 热影响区小:这是由于焊接速度高,工件自冷作用强,故热影响区窄且不易发生氧化,从而可获得良好组织与性能的焊缝。

3) 待焊处表面可不必进行焊前清理。

(2) 高频感应焊管优点 与高频电阻焊管相比其主要优点如下:

1) 焊管表面光滑,特别是焊道内表面较平整。

2) 感应圈不与管壁接触,故对管坯接头及表面质量要求比较低,也不会像高频电阻焊时那样可能引起管子表面烧伤。

3) 因不存在电极(滑动触头)压力,故不会引起管坯局部失稳变形,也不会引起管坯表面镀层擦伤,因此适宜于制造薄壁管和涂层管。

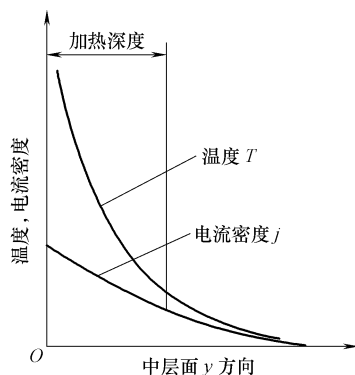


图 2-5-3 A—A 剖面的中层面上电流密度 j 与温度 T 分布

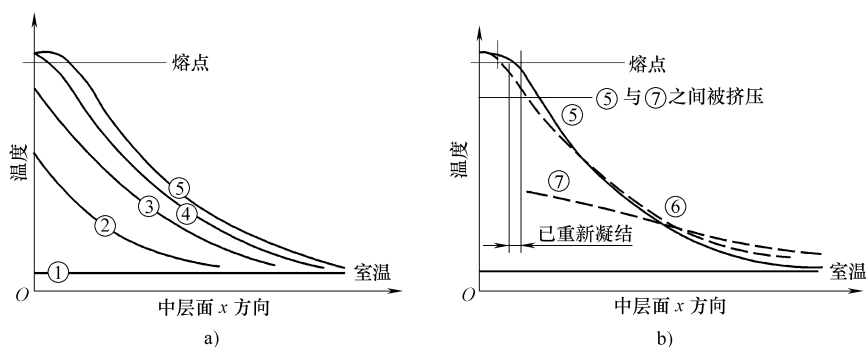


图 2-5-4 焊接区不同位置上温度分布

a) 加热区间不同位置上温度分布 b) 挤压顶锻区间不同位置上温度分布

4) 不用电极, 因而省料省时, 也不存在电极脱离工件造成功率传输不稳而影响焊接质量等问题。

但是, 高频感应焊能量损失较大, 在使用相同功率焊制同种规格管子时, 其焊接速度仅为电阻法的 $1/3 \sim 1/2$, 因而对中、大径管的制造则以选用电阻法为宜。

2. 高频焊的焊接参数及选择

高频焊优质接头的获得主要取决于能否建立理想焊接状态以及是否能将氧化物及其他杂质挤出接头焊缝区。其关键是在焊接区的板内、外边缘获得一致的温度, 并使挤压力与加热温度有适当的匹配。除材质因素外, 主要影响因素有电源频率、管坯坡口形状、汇合角、电极和感应圈及阻抗器的安放位置、输入功率、焊接速度、焊接压力等。

(1) 电源频率 频率的提高有利于趋肤效应和邻近效应的发挥, 提高焊接效率, 但要获得优质焊缝, 频率选择主要取决于管坯材质及其壁厚。一般焊有色金属管的频率要比焊碳钢管时为高, 这主要因有色金属管的热导率高所致。同时, 为保证对口两边加热宽度适中, 又能保证厚度方向加热均匀, 通常焊薄壁管时选择频率高些, 焊厚壁管时选择频率低些。例如, 焊制碳钢管多采用 $350 \sim 450\text{kHz}$ 的频率, 而在制造特别厚壁管时, 采用 50kHz 频率。

(2) 管坯坡口形状 通常采用 I 形坡口, 可使沿厚度方向加热均匀, 而且坡口准备容易。但当管坯厚度很大时, I 形坡口将使坡口横断面的中心部分加热不足, 而其上、下边缘加热过度, 这时可选用双 V 形坡口以使横断面加热均匀, 焊后接头硬度也趋向一致。

(3) 汇合角的选择 汇合角 α 的大小对高频焊闪光过程的稳定性、焊缝质量、焊接效率均有很大影响。通常取 $2^\circ \sim 6^\circ$ 比较适宜 (图 2-5-5)。汇合角过小, 将使闪光过程不稳定, 焊缝中易产生弧坑、针孔等缺陷; 汇合角过大, 将使邻近效应减弱, 功耗增加。同时, 过大的 α 角易引起管坯边缘产生皱褶。

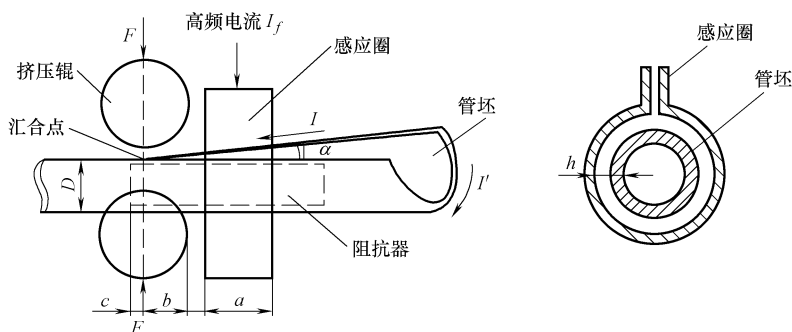


图 2-5-5 直缝钢管的焊接示意图

(4) 安放位置 电极、感应圈及阻抗器安放位置如下。

1) 电极位置：在高频电阻焊中，电极安放位置应尽可能靠近挤压辊，与其中心线距离取20 ~ 150mm，焊铝管时取下限，焊壁厚 10mm 以上低碳钢管时取上限，见表 2-5-1。

2) 感应圈位置：在高频感应焊中，感应圈应与管子同心放置（图 2-5-5），其距两挤压辊轮中心连线也应尽可能靠近（表 2-5-2）。同时，应注意感应圈宽度 a 与管坯直径 D 关系为 $a = (1.0 \sim 1.2) D$ ；感应圈内径与管坯表面间隙 $h \approx 3 \sim 5\text{mm}$ （图 2-5-5）。

表 2-5-1 电极位置（低碳钢）

管外径 D/mm	16	19	25	50	106
至两挤压辊中心连线距离 L/mm	25	25	30	30	32

表 2-5-2 感应圈位置（低碳钢）

管外径 D/mm	25	50	75	100	125	150	175
至两挤压辊中心连线距离 L/mm	40	55	65	80	90	100	110

3) 阻抗器位置：阻抗器应与管坯同轴安放，移动阻抗器、感应圈的前后位置，均可加强或减弱对口边缘加热，调节板厚方向内外温度至接近一致。通常阻抗器前端可超出两挤压辊轮中心线 $c = 3 \sim 4\text{mm}$ ，如图 2-5-6 所示。但可能使移动阻抗器的次数增加，影响焊接生产正常进行，所以在保证质量的条件下， c 也可以选为零值或距离该中心连线 $10 \sim 20\text{mm}$ 。同时，阻抗器（磁棒）的断面积应约为管坯内圆断面积的 75%，且与管坯内壁之间的间隙为 $6 \sim 15\text{mm}$ 。

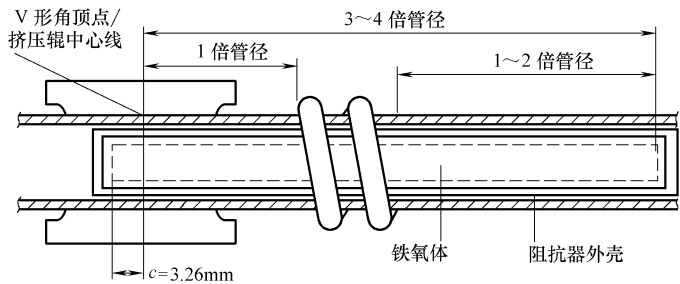


图 2-5-6 阻抗器安装位置

(5) 输入功率的选择 生产上用振荡器输入功率来度量输出给焊缝的加热功率。输入功率小时，因管坯坡口面加热不足，达不到焊接温度而产生未焊透缺陷；输入功率过大，将使坡口面加热温度过高而引起过热或过烧，甚至使焊缝击穿，造成熔化金属严重喷溅而形成针孔或夹渣缺陷。

(6) 焊接速度的选择 焊接速度是主要焊接参数。随着焊接速度的提高，管坯坡口面挤压速度会随着提高，这有利于将焊接区液态金属层和氧化物挤出去，得到优质的固相连接。然而，在输入功率一定的情况下，焊接速度不可能无限制提高，否则将达不到理想的焊接温度。焊接速度可用式（2-5-1）估算。

$$v = \frac{P}{K_1 K_2 \delta b} \tag{2-5-1}$$

式中 P ——高频振荡器输入功率，单位为 kW；

K_1 ——与管坯材质有关的经验系数，见表 2-5-3；

K_2 ——与管径有关的修正系数，高频电阻焊取 1，高频感应焊时取值见表 2-5-4；

δ ——管坯壁厚，单位为 mm；

b ——坡口两边加热区宽度，单位为 cm，一般设 $b = 10\text{mm}$ ；

v ——焊接速度，单位为 m/min。

表 2-5-3 K_1 值

材料种类	K_1	材料种类	K_1
低碳钢	0.8 ~ 1.0	18-8 不锈钢	1.0 ~ 1.2
铝	0.5 ~ 0.7	铜	1.4 ~ 1.6

表 2-5-4 感应焊时的 K_2 值

管外径		K_2
mm	in	
25	1	1.00
50	2	1.11
75	3	1.25
100	4	1.43
125	5	1.67
150	6	2.00

注：1in = 25.4mm。

(7) 焊接压力的选择 焊接压力是高频焊主要焊接参数。一般以 100 ~ 300MPa 为宜，生产上以管坯被挤压的量来表示，它是通过改变挤压辊间距来调节的。挤压量也常用挤压辊前后管材的周长差 ΔL 来表示，其具体值随管壁厚度不同而异，见表 2-5-5。

表 2-5-5 挤压量的经验值

管壁厚 δ /mm	≤ 1.0	1.0 ~ 4.0	4.0 ~ 6.0
周长差 ΔL /mm	δ	$\frac{2}{3}\delta$	$\frac{1}{2}\delta$

3. 高频直缝焊管

(1) 低合金高强度钢管纵缝高频焊 碳当量 $CE < 0.2\%$ 的碳素钢管，其高频焊的焊接性良好，焊后可不进行热处理。但低合金高强度钢管的 CE 通常在 $0.2\% \sim 0.65\%$ ，在高频焊过程中，由于趋肤效应、邻近效应和热传导的共同作用，造成了管坯边缘附近的温度分布梯度、形成了熔化区、部分熔化区、过热组织区、正火区、不完全正火区、回火区等特殊区域。其中过热组织区由于焊接温度在 1373K 以上，奥氏体晶粒急剧长大，冷却后晶粒粗大，在一定化学成分和冷却速度条件下还会形成淬硬组织。此外，由于温度梯度的存在也会产生焊接应力，作为综合结果，接头力学性能将低于母材，所以必须进行焊后热处理，即所谓“焊缝物理无缝化处理”。主要有以下两种方法：

1) 焊缝局部常化处理：切除钢管外飞边后，在通水冷却和定径之前，用中频感应加热装置（图 2-5-7）将焊缝热影响区加热至约 1200K，然后空冷至 811K 以下，这是一种在线正火热处理，适用于较大管径的钢管（外径 200mm 以上）。

2) 整体常化处理：对于直径较小的钢管，可以采用中频感应或火焰加热方法将管坯加热到 1173K 以上，然后空冷或在带有可控气氛的冷却室中冷却下来。当焊接含有易生成难熔氧化物元素（如 Cr）的管坯时，为减少焊缝中的氧化夹杂，可在高频焊接装置处和管坯内部喷送中性气体流（ N_2 ）进行气体保护。

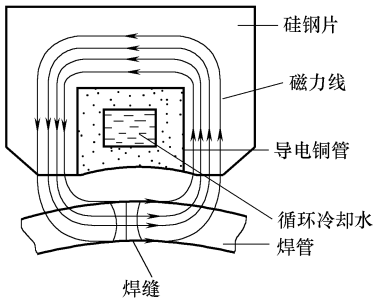


图 2-5-7 中频感应加热焊缝

(2) 不锈钢管纵缝的高频焊 不锈钢的导热性差，电阻率高，可用较低的输入功率和较高的

焊接速度焊接,其V形角的角度推荐为 $5^{\circ} \sim 7^{\circ}$ 。由于不锈钢高温强度大需要增大焊接压力,比焊低碳钢管大 $40 \sim 50\text{MPa}$ 。同时,不锈钢管纵缝高频焊的主要问题是焊接热影响区由于碳化物析出使耐蚀性降低。采用焊前固溶处理、高的焊接速度,并紧接着焊后使管材通过冷却器进行急冷等措施,在不用惰性气体保护的情况下就可得到耐蚀性良好的接头。

(3) 铝合金管纵缝的高频焊 铝合金管纵缝高频焊的关键是必须将对口中难熔氧化物 Al_2O_3 挤出焊缝,这就要求提高焊接速度,约为焊接钢管时的2倍,只有这样才可缩短在液态温度下的停留时间,减少散热所引起的温度降低,并可增加挤压速度,促进氧化物的挤出。其V形角的角度推荐为 $5^{\circ} \sim 7^{\circ}$,当V形角的角度较小时,易产生冷焊和夹杂缺陷。同时,铝合金是非导磁体,高频电流穿透深度较大,要求高频电源的电压和功率应具有较高的稳定度及较小的波纹系数(小于1%),并应选取较高的电源频率。

4. 高频螺旋缝焊管

高频螺旋缝焊管简称高频螺旋焊管,除能使用较窄的带钢(卷带)焊出直径很大的管子外,还能用同一宽度的带钢焊出不同直径的管材。焊接时,将带钢连续地送入成型轧机,使之螺旋地绕心轴弯曲成圆筒状,并使其边缘间相互形成对接(图2-5-8a)或搭接缝(图2-5-8b)同时又构成相应的V形汇合角,然后再用高频接触法进行连续焊接。对接缝一般用于制造厚壁管;搭接缝则用于生产薄壁管。为避免对接端面出现不均匀加热,接头两边应加工成 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 角的坡口。搭接缝的搭接量可随管坯厚度的不同在 $2 \sim 5\text{mm}$ 选取。用 200kW 高频电源可制造壁厚 $6 \sim 14\text{mm}$,直径达 1024mm 的大直径螺旋接缝管,焊接速度可达 $30 \sim 90\text{m/min}$ 。由于螺旋管比直缝管承载能力大,多用于石油、天然气管道。

综上所述,高频焊可焊接低碳钢、低合金高强度钢、不锈钢、铝及铝合金、钛及钛合金(需用惰性气体保护)、铜及铜合金(黄铜件要使用焊剂)、镍、锆等金属材料;可焊接薄壁管、电缆套管、直缝管、螺旋缝管、鳍片管、结构型材(T形、I形、H形等)、板(带)材等。

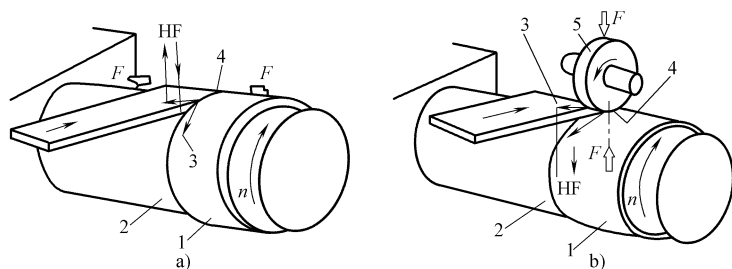


图2-5-8 高频螺旋焊管示意图

a) 对接螺旋缝 b) 搭接螺旋缝

1—成品管 2—心轴 3—电极位置 4—焊合点 5—挤压辊轮

HF—高频电源 F—挤压力 n—管子旋转方向

5.1.3 高频焊设备的选择

高频焊设备主要用于制管,它是由水平导向辊1、高频发生器及其输出装置(输出变压器)2、挤压辊3、外飞边清除器4、磨光辊5、机身6以及一些辅助机构、工具等部分组成,如图2-5-9所示。这里仅介绍与焊管质量和生产效率关系密切的部分。

1. 高频发生器

制管用的高频发生器有两种,即电子管高频振荡器和固态变频器。

电子管高频振荡器频率可达 100 ~ 500kHz, 如图 2-5-10 所示。电网经电路开关 1、接触器 2、晶闸管调压器 3 向升压变压器 4 和整流器 5 供电, 输出高压直流电供给振荡器 8 (为保证电压脉动系数小于 1%, 必须在高压整流器的输出端加设滤波器 6, 振荡器将高压直流电转变为高压高频电供给输出变压器 7。最后输出变压器再将高电压小电流的高频电转变为低电压大电流的高频电, 并直接输给电极 (滑动触头) 或感应圈。调整高频振荡器输出功率的方法有自耦变压器法、闸流管法、晶闸管法、饱和电抗器法 4 种。

固态变频器频率可高达 800kHz, 如图 2-5-11 所示。高频变换器使用 MOSFET 管组成, 一般采用电流反馈电路, 与真空振荡管高频电源相比, 固态高频电源有以下特点。

- 1) 效率高: 转换效率达 80% 以上, 比电子管电源节能 30% 以上。
- 2) 可靠性高, 寿命长: 单元式结构, 使用寿命 10 万 h 以上。
- 3) 安全: 输出电压低, 小于 500V。
- 4) 装置体积小, 安装空间仅是电子管时的 1/3。
- 5) 输出频率高 (800kHz), 功率脉动小 (小于 0.2%), 对焊接高导热性的有色金属很有利。

2. 电极

滑动触头作为电极是向管坯馈电的重要装置, 由于要在高温下且与管壁发生高速滑动摩擦的条件下传导高频电流, 通常选用铜钨、银钨和钨钨等合金材料并可制成复合结构 (图 2-5-12), 即用银钎焊将触头块 2 焊到由铜或钢制的触头座 1 上。触头块尺寸为宽 4 ~ 7mm、高 6.5 ~ 7mm、长 15 ~ 20mm, 可传导的焊接电流为 500 ~ 5000A, 对管壁的压力为 22 ~ 220N。

3. 感应圈

感应圈又称感应器, 是高频感应焊制管机的重要组件, 其结构形式及尺寸大小对能量转换和效率影响很大, 常用的感应圈结构如图 2-5-13 所示。材质选用纯铜, 内通冷却水, 外缠绝缘玻璃丝带并浇灌环氧树脂以确保匝间绝缘。

同时, 应该注意电子管和 MOSFET 管高频电源有许多不同, 前者输出为高电压、小电流, 后者输出为低电压、相对高电流, 因此对感应圈要求也不同, 表 2-5-6 和表 2-5-7 可作为感应圈选择时的参考。

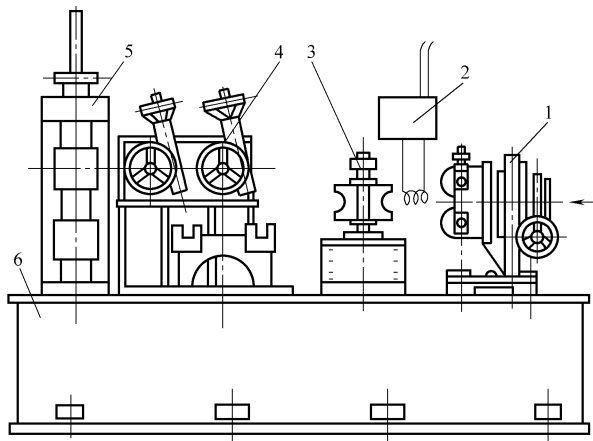


图 2-5-9 高频焊制管机组

1—水平导引辊 2—高频发生器及其输出装置 3—挤压辊
4—外飞边清除器 5—磨光辊 6—机身

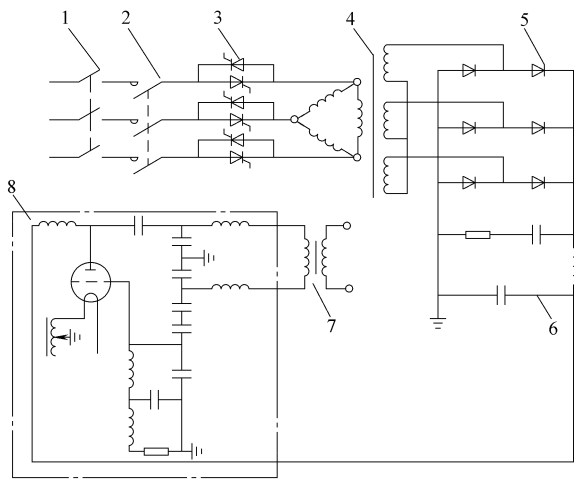


图 2-5-10 高频振荡器的基本线路

1—电路开关 2—接触器 3—晶闸管调压器 4—升压变压器
5—整流器 6—滤波器 7—输出变压器 8—振荡器

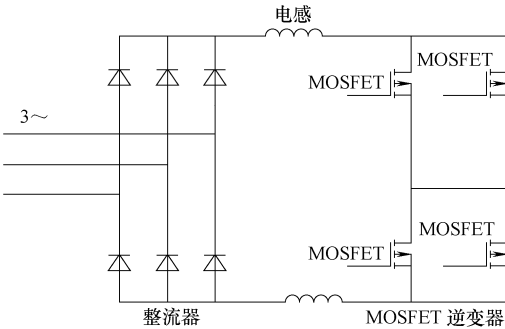


图 2-5-11 固态高频电源主电路

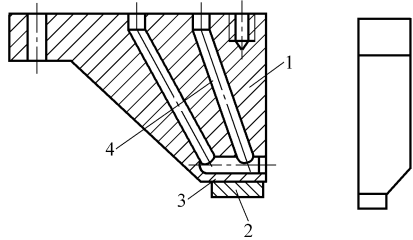


图 2-5-12 电极结构示意图

1—触头座 2—触头块 3—钎焊缝 4—冷却水孔

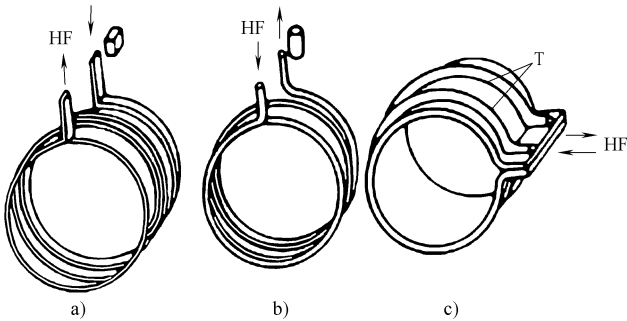


图 2-5-13 典型的感应圈结构

a) 方管多匝 b) 圆管多匝 c) 板制单匝

HF—高频电源 T—冷却水管

表 2-5-6 电子管高频焊机感应圈推荐尺寸

(单位: mm)

管外径	感应圈内径	管外径	感应圈内径	管外径	感应圈内径
12. 700	15. 875	38. 100	50. 800	88. 900	101. 6
15. 875	22. 225	44. 450	57. 150	95. 250	114. 3
19. 050	25. 400	50. 800	63. 500	101. 600	114. 3
23. 825	28. 575	57. 150	69. 850	114. 300	127. 0
25. 400	31. 750	63. 500	76. 200	127. 000	152. 4
28. 575	38. 100	71. 450	88. 900	139. 700	177. 8
28. 575	44. 450	76. 200	88. 900	152. 400	177. 8

表 2-5-7 CFI² 固态高频焊机标准感应圈 (功率 50 ~ 350kW)

管外径/mm	感应圈内径/mm	感应圈长度/mm	感应圈结构	感应圈圈数	铜管外径/mm
13	19	25	多匝结构	2	6. 35
16	24	25	多匝结构	2	6. 35
19	27	19	多匝结构	2	6. 35
22	32	19	多匝结构	2	6. 35
29	42	64	多匝加箍结构	2	9. 50
32	46	64	多匝加箍结构	2	9. 50
38	51	76	多匝加箍结构	2	9. 50
44	58	90	多匝加箍结构	2	9. 50
51	65	112	多匝加箍结构	2	9. 50
57	72	112	多匝加箍结构	2	9. 50

(续)

管外径/mm	感应圈内径/mm	感应圈长度/mm	感应圈结构	感应圈圈数	铜管外径/mm
64	80	47	单匝加箍结构	1	9.50
76	90	47	单匝加箍结构	1	9.50
79	95	47	单匝加箍结构	1	9.50
89	105	47	单匝加箍结构	1	9.50
102	120	67	单匝加箍结构	1	9.50
114	140	76	单匝加箍结构	1	9.50

4. 阻抗器

阻抗器是高频焊时的一个重要辅助装置，其主要元件是磁心，作用是增加管壁背面的感抗，即增加内壁回路的阻抗，以迫使电流沿待焊边缘流动，从而减少无效电流、增加焊接有效电流、提高焊接速度。磁心采用高居里点、高磁导率的铁氧体材料（如 MXO 或 NXO 型）。阻抗器结构如图 2-5-14 所示。磁心由直径为 10mm 的磁棒组成，外壳为夹布胶木或玻璃钢，在易于发生损坏的场合也可采用不锈钢和铝等，阻抗器内部应能通水冷却，以免焊接时发热而影响导磁性。阻抗器长度要与管材直径相适应：焊 1.5in 以下管子时，长度为 150 ~ 200mm；焊接 2 ~ 3in 管子时，长度为 250 ~ 300mm；而焊接 4 ~ 6in 管子时，长度为 300 ~ 400mm（1in = 25.4mm）。

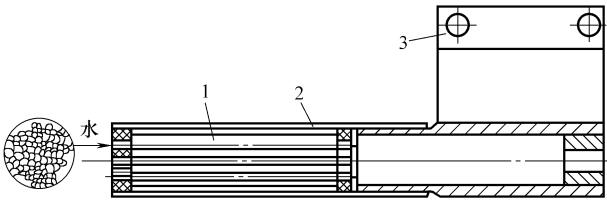


图 2-5-14 圆形断面阻抗器的结构
1—磁棒 2—外壳 3—固定板

高频焊管生产线除高频焊制管机外，还有其他相关设备（如开卷机、直头机、矫平机、活套、矫直机、铣头倒棱机、飞锯机、剪切对焊机等），在设备选用时应一并考虑。

目前，国内生产的金属管焊接用高频感应加热设备主要技术参数如下：功率挡（60kW、100kW、200kW、300kW、400kW、600kW、700kW、800kW）、频率挡（200 ~ 300kHz、400kHz、600kHz、1 ~ 2MHz）、焊管直径（ $\phi 8 \sim \phi 48\text{mm}$ 、 $\phi 20 \sim \phi 45\text{mm}$ 、 $\phi 20 \sim \phi 76\text{mm}$ 、 $\phi 60 \sim \phi 114\text{mm}$ 、 $\phi 90 \sim \phi 219\text{mm}$ 、 $\phi 114 \sim \phi 273\text{mm}$ ）、焊管壁厚（0.5 ~ 1.0mm、1.25 ~ 2.75mm、2.75 ~ 4mm、3.5 ~ 12mm）、焊接方式（直缝焊、螺旋焊、感应焊、电阻焊）。例如，GP400—0.2—H21（钢管高频缝焊、400kW、200kHz、新型三回路、FU—914—S 振荡管）。

5.1.4 高频焊应用实例

1. 螺旋翅片管高频焊

由于翅片管传热面积大、效率高和压降小，使以其为核心元件的各种换热设备在电力、化肥、化工和炼油装置中得到日益广泛应用。

（1）焊接原理 翅片管是在无缝钢管外圆上按一定螺距缠绕钢带，钢带垂直于钢管外圆的表面，以高频电流作为热源局部加热接触面及待焊区，同时在翅片管外侧施加顶锻力，实现接触面的固相焊接，如图 2-5-15 所示。

这里仅就翅片管中焊接难度较大的 SA335P91 耐热钢管（日本产，相当于国内 9Cr-1Mo 钢）对 06Cr13（山西太钢产）钢带的高频焊简单介绍。

（2）焊前准备 管料表面不应有明显凹坑并进行喷砂清理，以去除油、锈等污物；顶锻轮的制备要保证其对钢带的夹持在圆周方向上松紧均匀适度（有 0.1 ~ 0.2mm 余量），内件相对转动轻松自如；电极极身与触头间的焊接牢固可靠，冷却顺畅，无泄漏。

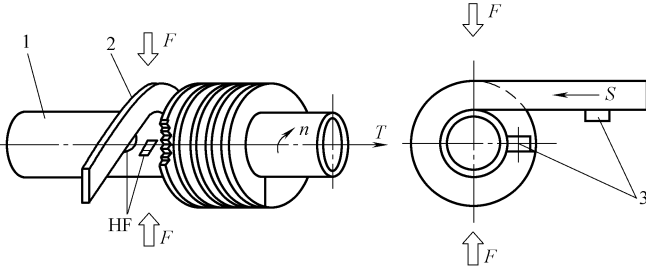


图 2-5-15 螺旋翅片管焊接原理
1—无缝钢管 2—钢带 3—电极

(3) 焊接参数 化工行业《HG/T 3181—2009 高频电阻焊螺旋翅片管》及机械行业《JB/T 6512—1992 高频电阻焊螺旋翅片管》锅炉用制造技术条件等标准。而对 P91-0Cr13 翅片管焊缝的金相分析表明（图 2-5-16），翅片钢管的交界处还有清晰的分界线，并可看到焊道翅片两旁钢带熔渣的堆积现象。这主要因为：高频焊属固相连接；翅片与钢管为异质材料；不对称钢体焊接存在一根本性问题，即钢带上电流集中，容易达到焊接温度，而钢管上电流太分散，不容易集中，钢管温度往往低于钢带的温度，影响焊接质量及焊接效率；顶锻轮的分流和触头电极位置偏离等。因此，翅片管焊接参数的优化和监控至关重要，具体数据见表 2-5-8。



图 2-5-16 焊缝金相图

表 2-5-8 焊接参数

钢管	钢带	阳极电压	阳极电流	栅极电流	栅极电压	转速	顶锻轮直径	焊头高度	螺距
材质规格	材质规格	U/kV	I/A	I/A	U/kV	n/(m/min)	D/mm	h/mm	d/mm
P91φ73mm×9.56mm	06Cr13 17.5mm×1.5mm	9.5×10.5	14~17	3~4	85~100	7.5~9	60~63	18~23	6

(4) 焊接检验 主要检查如下项目。

1) 外观检验：焊后进行外观检验，见表 2-5-9，结果满足标准要求。

2) 焊着率检验：将翅片管剥开 2~3 圈，每 120°测 1 次，依据焊着率 = 实际焊缝宽度/钢带名义厚度，检测结果为 97%~106%，满足标准要求。

3) 金相检验：管侧从接合面起，金相组织依次为：淬火 + 回火组织（回火马氏体 M），不完全正火组织（原组织铁素体 F + 正火铁素体 F' + 正火珠光体 P'）及原正火组织（铁素体 F + 珠光体 P），同时，未发现夹渣、未熔合和裂纹等宏观缺陷，如图 2-5-17 所示。

表 2-5-9 翅片管外观检测表

检查项目	外观尺寸	排渣	塑性增厚	刮声检查
状况描述	翅片高度 14.8~15.4mm 螺距 5.95~6.05mm 翅片倾斜度 0°~4°	主要分布于直线推进方向反面，粒状，均匀稳定	塑性增厚集中于根部，翅片片身直立无变形	清脆悦耳，没有浊音

应该指出, 淬火区的马氏体已发生回火转变, 因此焊后不再需要进行热处理, 这是因为管子淬火冷却后在随后的翅片焊接中又受到重复受热, 相当于回火处理。因此淬火组织已完全转变成回火组织, 消除了淬硬裂纹产生的可能性, 因此没有必要再重复进行回火处理。

4) 力学性能检验: 根据产品制造技术要求和 Q/SH. MM. 25—2000 标准对翅片管焊接接头做抗拉强度、抗冲击性能、水压 (12MPa) 试验, 试验结果均可满足要求。



图 2-5-17 管侧金相图

2. 轻型 H 型钢高频焊生产线

H 型钢又叫做宽翼缘工字钢, 是现代建筑、桥梁和机械设备中广泛应用的一种型钢。由于用量大, 各国都已进行规格化和系列化定型大量生产。

国外某公司用高频电阻焊 (接触法) 方法生产的不同断面 (图 2-5-18) 的轻型 H 型钢, 材质为普通碳素结构钢和高强度结构钢。H 型钢高度为 101 ~ 609.6mm, 翼缘宽度为 38.1 ~ 305mm, 腹板厚度为 1.6 ~ 12.7mm, 翼缘厚度为 2.4 ~ 19mm。可以是对称断面, 也可以是非对称断面; 可以是同质材料, 也可以是异质钢材。高频焊机发生器的频率为 960Hz、3000Hz 和 10000Hz; 焊接高度为 305mm 的 H 型钢的焊机功率为 280kW; 焊接高度为 533mm 的 H 型钢, 高频焊机功率为 560kW。

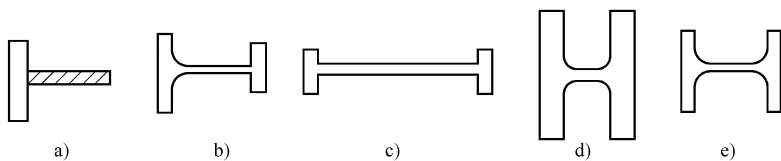


图 2-5-18 不同断面类型的轻型 H 型钢

a) 不同钢种 b) 不等宽翼缘 c) 超高腹板 d) 特厚翼缘 e) 不等厚翼缘

焊接是利用高频电流流经焊接区加热同时加压后完成的, 图 2-5-19 为焊接电流导流图。焊接时, 通过滑动触头 (电极) 1 将电压为 50 ~ 200V、频率为 450kHz 的高频电流传递给一个翼缘板, 该电流沿着翼缘板和腹板端面 V 形区 (开角 $4^\circ \sim 7^\circ$) 流过, 然后通过腹板上的导流滑动触头 (辅助电极) 2 流经腹板另一端 V 形区后由滑动触头 (电极) 3 流出, 形成焊接回路。注意, 由于翼缘板较厚, 调整触头位置以使热量分布合适是很重要的。同时, 焊前必须对腹板的边缘进行冷镦粗处理, 只有镦粗才能保证 T 形焊缝处、腹板全厚和翼缘板焊合良好, 去飞边后可得到全焊透的合格接头 (图 2-5-20b)。而没有进行镦粗处理时, 则只能焊合腹板厚度的 80% ~ 85% (图 2-5-20a)。

高频电阻焊 H 型钢机组组成如图 2-5-21 所示, 生产过程如下: 上翼缘板、腹板和下翼缘板的卷钢坯料分别在卷钢开卷机 1 所指三处开卷, 然后用闪光对焊机接料 (仅在前卷钢坯料快用完时); 对于腹板尚需在腹板边缘镦粗机 3 处预镦粗两边缘, 然后与经过翼板矫平机 4 后的上、下翼缘板一起送入高频电阻焊机 5 处进行焊接; 焊后立即在 6 处去飞边整形, 经 7 处冷却后进入矫正机组 8 进行纵向矫直及翼缘矫直, 经 9 处无损检验焊缝质量, 最后按所需长度在飞锯 10 处切断即得成品。

该公司轻型 H 型钢焊接生产线的平面布置如图 2-5-22 所示, 从进料到出成品整个加工过程都是机械连续不断地自动进行, 生产效率很高。

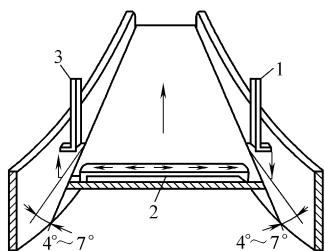


图 2-5-19 高频电阻焊接的电流导流图

1、3—滑动触头 2—导流滑动触头

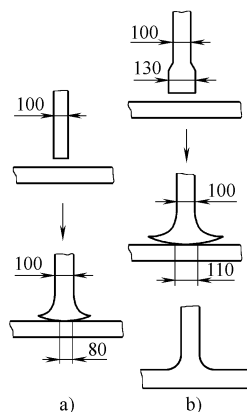


图 2-5-20 腹板边缘镢粗处理对焊透的影响

a) 焊前未镢粗 b) 焊前经冷镢粗处理

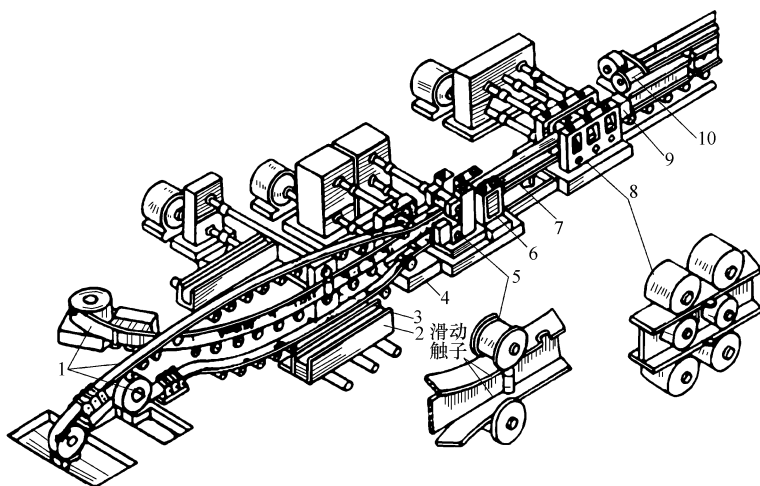


图 2-5-21 高频电阻焊 H 型钢机组

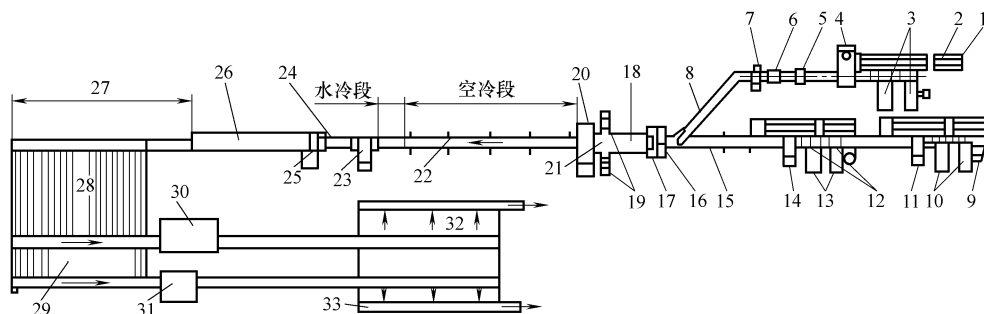
1—卷钢开卷机 2—翼板毛坯输送装置 3—腹板边缘镢粗机 4—翼板矫平机 5—高频电阻焊机
6—去飞边整形装置 7—冷却 8—矫正机组 9—无损检验设备 10—飞锯

图 2-5-22 H 型钢焊接生产线平面布置

1—三个钢带卷用的承载平台 2—带卷运输车 3—腹板开卷机 4—腹板矫直机 5—翼板剪切机 6—腹板对焊机 7—腹板活套装置 8—腹板定向台 9—液压装置 10—上翼板开卷机 11—上翼板矫直机 12—卸卷装置 13—下翼板开卷机 14—下翼板矫直机 15—输送机 16—镢粗辊机 17—腹板镢粗装置 18—焊机架 19—焊机 20—拉伸传动机架 21—去飞边整形装置 22—输送机 23—翼板矫直机 24—无损检测设备 25—H 型钢锯断长度测量装置 26—飞锯 27—输出轨道 28—拖运机机架 29—拖运机 30—大型 H 型钢矫直机 31—轻型 H 型钢矫直机 32—成品检验台 33—输出

5.2 超声波焊

超声波焊 (Ultrasonic Welding, UW) 是利用超声波的高频振动, 在静压力的作用下, 将弹性振动能量转变为工件间的摩擦功和形变能, 对焊件进行局部清理和加热焊接的一种压焊方法。主要用于连接同种或异种金属、半导体、塑料及金属陶瓷等材料。

5.2.1 超声波焊基本原理

1. 焊接原理

超声波焊的基本原理如图 2-5-23 所示, 焊件 8 被夹持在上声极 7 和下声极 9 之间, 并施加一定的压力进行焊接。所需的焊接热能是通过一系列能量转换及传递环节而获得的, 超声波发生器是一个变频装置, 它将工频电流转变为超声频 (15 ~ 60kHz) 的振荡电流。换能器则利用逆压电效应转换成弹性机械振动能。传振杆、聚能器用来放大振幅, 并通过耦合杆、上声极传递到工件。换能器、传振杆、聚能器、耦合杆及上声极构成一个整体, 称为声学系统。声学系统各个组元的自振频率将按同一个频率设计。当发生器的振荡电流频率与声学系统的自振频率一致时, 系统即产生了谐振 (共振), 并向工件输出弹性振动能。

超声波焊时, 超声波发生器 1 产生每秒几万次的高频振动, 通过换能器 2、传振杆 3、聚能器 4 和耦合杆 5 向焊件输入超声波频率的弹性振动能。两焊件的接触界面在静压力和弹性振动能量的共同作用下, 通过摩擦、温升和变形, 使氧化膜或其他表面附着物被破坏, 并使纯净界面之间的金属原子无限接近, 实现可靠连接。当金属构件焊接时, 伴随界面的物理冶金过程, 原子产生结合与扩散, 整个焊接过程没有电流流经焊件, 也没有火焰或电弧等热源的作用, 而是一种特殊的焊接过程, 具有摩擦焊、扩散焊或冷压焊的某些特征。当塑料材料进行连接时, 由于两焊件界面处的声阻大, 产生局部高温, 致使接触面迅速熔化, 在压力的作用下使其熔合为一体; 当超声波停止作用后, 让压力持续几秒钟, 使其凝固定型, 形成坚固的分子链, 达到焊接的目的, 其接头强度和母材相近。

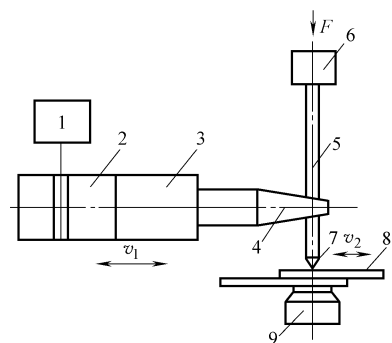


图 2-5-23 超声波焊原理

- 1—超声波发生器 2—换能器 3—传振杆
4—聚能器 5—耦合杆 6—静载
7—上声极 8—焊件 9—下声极
 F —静压力 v_1 —纵向振动方向
 v_2 —弯曲振动方向

2. 接头形成机理

(1) 接头形成过程 超声波焊的焊接过程与电阻焊类似, 由“预压”、“焊接”和“维持”3个步骤形成一个焊接循环, 从接头形成的微观机理上分析, 超声波焊经历了以下3个阶段。

1) 振动摩擦阶段: 超声波焊的第一个过程主要是摩擦过程, 其相对摩擦速度与摩擦焊相近, 只是振幅仅仅为几十微米。这一过程的主要作用是排除工件表面的油污、氧化物等杂质, 使纯净的金属表面暴露出来。焊接时, 由于上声极的超声振动, 使其与上焊件之间产生摩擦而造成暂时的连接, 然后通过它们直接将超声振动能传递到焊件间的接触表面上, 在此产生剧烈的相对摩擦, 由初期个别凸点之间的摩擦, 逐渐扩大摩擦面, 同时破坏、排挤和分散表面的氧化膜及其他附着物。

2) 温度升高阶段: 在继续的超声波往复摩擦过程中, 接触表面温度升高 (焊接区的温度约为金属熔点的 35% ~ 50%), 变形抗力下降, 在静压力和弹性机械振动引起的交变切应力的共同作用下, 焊件间接触表面的塑性流动不断进行, 使已被破碎的氧化膜继续分散甚至深入到被焊接材料内

部,促使纯金属表面的原子无限接近到原子能发生引力作用的范围内,出现原子扩散及相互结合,形成共同的晶粒或出现再结晶现象。

3) 固相接触阶段:随着摩擦过程的进行,微观接触面积越来越大,接触部分的塑性变形也不断增加,焊接区内甚至形成涡流状的塑性流动层(图2-5-24),出现焊件间的机械咬合。焊接初期咬合点较少,咬合面积也较少,接合强度不高,很快被超声振动所引起的剪切应力所破坏。随着焊接过程的进行,咬合点数和咬合面积逐渐增加,当焊件之间的结合力超过上声极与上焊件之间的结合力时,切向振动不能切断焊件之间的结合,形成牢固的接头。

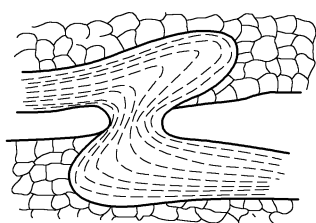


图2-5-24 超声波焊点区的
涡流状塑性流动层

超声波焊焊接接头的形成主要由振动剪切力、静压力和焊区的温升三个因素所决定,它们之间相互影响,相互制约,并和工件的厚度、表面状态及其常温性能有关。

(2) 接头组织特征 超声波焊的焊接接头呈现出复杂的组织结构,通过光学显微镜和电子显微镜观察可知,界面组织发生了相变、再结晶、扩散以及金属间的键合等冶金现象,是一种固相焊接过程,可以从四个方面分析接头的形成机理。

1) 机械嵌合:超声波焊焊接接头中常见到两焊件接触处形成塑性流动层,并呈现犬牙交错的机械嵌合,这种嵌合对连接强度起到有利的作用,但并不是金属的连接,在金属与非金属之间的超声波焊接时,这种机械嵌合作用占主导地位。

2) 金属原子间的键合:在超声波焊接接头中,焊接界面之间存在大量被歪扭的晶粒,这些晶粒是跨越界面的“公共晶粒”,其尺寸与母材金属的晶粒无明显差别,接头不存在明显的界面,两材料之间通过金属原子的键合而连在一起。可以认为,在焊接开始时,待焊接材料在摩擦功的作用下发生强烈的变形和塑性流动,特别是氧化膜去除或破碎以后,为纯净金属表面之间的接触创造了条件,而继续的超声弹性机械振动以及温升,又进一步使金属晶格上的原子处于受激状态,当金属原子相互接近到 $0.1 \sim 0.3\text{nm}$ 时,就有可能出现原子间相互作用的反应区,形成金属键。

3) 金属间的物理冶金过程:超声波焊中还有着由于摩擦生热所引起的再结晶、扩散、相变以及金属间化合物形成等冶金过程。到目前为止,该方面的研究较少,缺乏必要的证据,特别是短时间焊接时,接头中不一定出现再结晶组织或相变,但仍然能够形成接头,由此可知,再结晶、扩散和相变不是形成接头的必要条件。

4) 界面微区的熔化现象:超声波焊时,微区焊接温度很难精确测量,不能排除微区中出现局部熔化现象。用高倍透射电子显微镜对 0.4mm 厚的各种Al和Cu接头进行了微观组织分析,发现同种材料的焊缝厚度在微米范围内,焊缝区的晶粒尺寸只有 $0.05 \sim 0.2\mu\text{m}$,而轧制母材的晶粒尺寸为 $5 \sim 50\mu\text{m}$ 。如果用一般的方法将母材经过塑性变形和低于熔点的不同温度退火,此时再结晶形成的晶粒尺寸均大于 $3\mu\text{m}$,而没有发现更细小的晶粒。当Al和Cu进行超声波焊时,也同样发现连接区有焊接时新形成的微细晶粒,而且都是等轴晶粒,电镜分析中还观察到连接区微细晶粒边界的转角处有非熔化质点存在,这正是含有非熔解质点的金属加热熔化后发生凝固的特点。可以认为,超声波焊时,界面薄层或局部发生了短时熔化及随后的高速冷却过程。

5.2.2 超声波焊的焊接工艺

超声波焊的焊点,应有高的接合强度和合格的表面质量,除了表面不能有明显的挤压坑和焊点边缘的凸出以外,还应注意和上声极接触处的焊点表面情况,不允许有裂纹和局部未熔合,因此,超声波焊的形式选择、接头设计和焊接参数的选择非常重要。

1. 超声波焊的特点

1) 可焊的材料范围广, 可用于同种金属材料, 特别是高导电、高导热性的材料 (如金、银、铜、铝等) 和一些难熔金属, 也可用于性能相差悬殊的异种金属材料 (如导热性、硬度、熔点等)、金属与非金属、塑料等材料的焊接。还可以实现厚度相差悬殊以及多层箔片等特殊结构的焊接。

2) 焊件不通电, 不需要外加热源, 接头中不出现宏观的气孔等缺陷, 不生成脆性金属间化合物, 不发生像电阻焊时易出现的熔融金属的喷溅等问题。

3) 焊缝金属的物理和力学性能不发生宏观变化, 其焊接接头的静载强度和疲劳强度都比电阻焊接头的强度高, 且稳定性好。

4) 被焊金属表面氧化膜或涂层对焊接质量影响较小, 焊前表面准备工作比较简单。

5) 形成接头所需电能少, 仅为电阻焊的 5%; 焊件变形小。

6) 不需要添加任何粘结剂、填料或熔剂, 具有操作简便, 焊接速度快、接头强度高、生产效率高等优点。

超声波焊的主要缺点是受现有设备功率的限制, 因而与上声极接触的工件厚度不能太厚, 接头形式只能采用搭接接头, 对接接头还无法应用。

2. 超声波焊的分类

按照超声波弹性振动能量传入焊件的方向, 超声波焊的基本类型可以分为两类 (图 2-5-25), 一类是振动能由切向传递到焊件表面而使焊接界面产生相对摩擦, 这种方法适用于金属材料的焊接; 另一类是振动能由垂直于焊件表面的方向传入焊件, 主要是用于塑料的焊接。

常见的金属超声波焊接可分为点焊、环焊、缝焊及线焊。近年来, 双振动系统的焊接和超声波对焊也有一定的应用。

1) 点焊: 点焊是应用最广的一种焊接形式, 根据振动能量的传递方式, 可以分为单侧式、平行两侧式和垂直两侧式。振动系统根据上声极的振动方向也可以分为纵向振动系统、弯曲振动系统以及介于两者之间的轻型弯曲振动系统 (图 2-5-26)。500W 以下的小功率焊机多采用轻型结构的纵向振动, 千瓦以上的大功率焊机多采用重型结构的弯曲振动系统, 而轻型弯曲振动系统适用于中小功率焊机, 它兼有两种振动系统的优点。

2) 环焊: 环焊方法如图 2-5-27 所示, 主要用于一次成形的封闭形焊缝, 能量传递采用的是扭转振动系统。焊接时, 耦合杆带动上声极作扭转振动, 振幅相对于声极轴线呈对称分布, 轴心区振幅为零, 边缘位置振幅最大。该类焊接方法最适合于微电子器件的封装工艺, 有时环焊也用于对气密要求特别高的直线焊缝的场合, 用来代替缝焊。由于环焊的一次焊缝的面积较大, 需要有较大的功率输入, 因此常常采用多个换能器的反向同步驱动方式。

3) 缝焊: 和电阻焊中的缝焊类似, 超声波缝焊实质上是由局部相互重叠的焊点形成一条连续焊缝。缝焊机的振动系统按其焊盘振动状态可分为纵向振动、弯曲振动以及扭转振动 3 种形式 (图

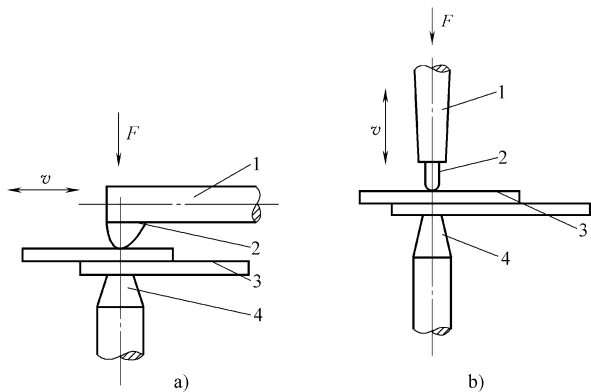


图 2-5-25 超声波焊的两种类型

a) 切向传递 b) 垂直传递

v—振动方向 1—聚能器 2—上声极 3—工件 4—下声极

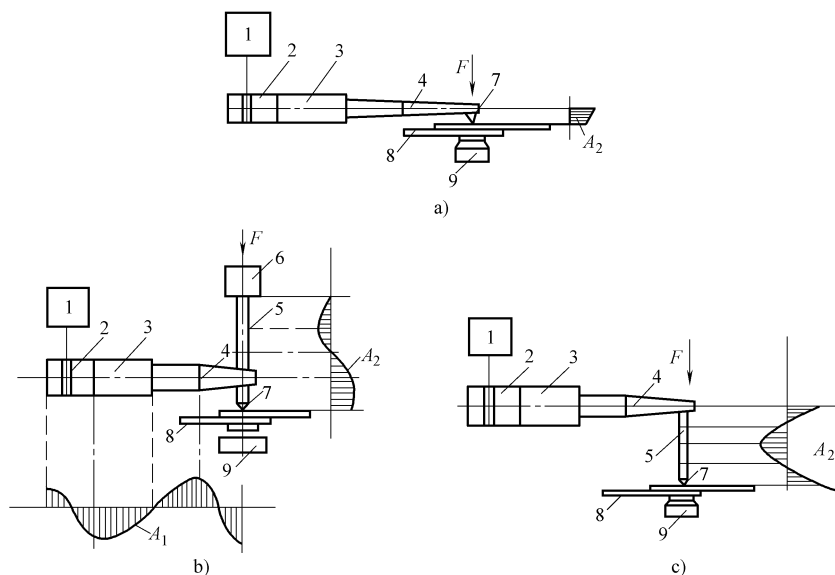


图 2-5-26 超声波点焊的类型

a) 纵向振动系统 b) 弯曲振动系统 c) 轻型弯曲振动系统

1—超声波发生器 2—换能器 3—传振杆 4—聚能器 5—耦合杆 6—静载 7—上声极 8—焊件 9—下声极
(F —静压力 A —振幅分布 A_1 —纵向振动振幅分布 A_2 —弯曲振动振幅分布)

2-5-28)。其中最常见的是纵向振动形式，只是滚盘的尺寸受到驱动功率的限制。缝焊可以获得密封的连续焊缝，通常工件被夹持在上下焊盘之间，在特殊情况下可采用平板式下声级。

4) 线焊：图 2-5-29 是线焊方法示意图，它是点焊方法的一种延伸，利用线状上声极，在一个焊接循环内形成一条狭窄的直线状焊缝，声极长度就是焊缝的长度，现在可以达到 150mm 长，这种方法最适用于金属箔的封口。

5) 双超声波振动系统的点焊：图 2-5-30 是采用两个不同频率的振动系统来完成一个焊点的点焊示意图，上下两个振动系统的频率分别为 27kHz 和 20kHz (或 15kHz)，上下振动系统的振动方向相互垂直，焊接时二者做直交振动。当上下振动系统的电源各为 3kW 时，可焊铝件的厚度达 10mm，焊点强度达到材料本身的强度。

双超声波振动系统多用于集成电路和晶体管细导线的焊接，虽然焊接方法与点焊基本相同，但焊接设备复杂，要求设备的控制精度高，以便实现焊点的高质量和高可靠性焊接。图 2-5-31 是用两个频率相同 (60kHz) 或不同 (40kHz 和 60kHz) 的纵向振动系统共同激励一弯曲振动棒而组成的细导线超声波焊接装置示意图。两个纵向振动系统互相垂直安装，控制两个不同频率振动系统的振幅或控制两个同频率振动系统的相位，焊头可以得到各种各样的振动轨迹。用这种方法焊细铝线所需要的振幅小，焊接时间更短。

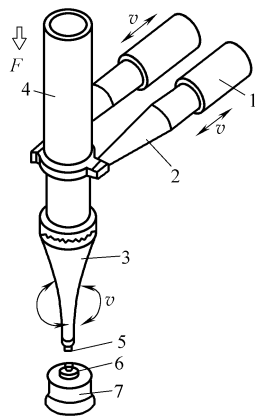


图 2-5-27 超声波环焊的工作原理

1—换能器 2、3—聚能器 4—耦合杆
5—上声极 6—工件 7—下声极
 F —静压力 v —振动方向

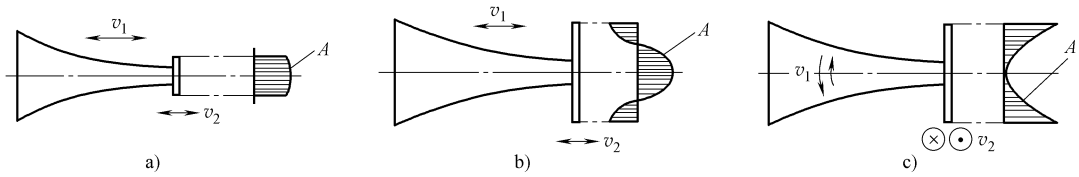


图 2-5-28 超声波缝焊的振动形式

a) 纵向振动 b) 弯曲振动 c) 扭转振动

A—焊盘上振幅分布 v_1 —聚能器上振动方向 v_2 —焊点上的振动方向

⊙—垂直于纸面 (向外) ⊗—垂直于纸面 (向里)

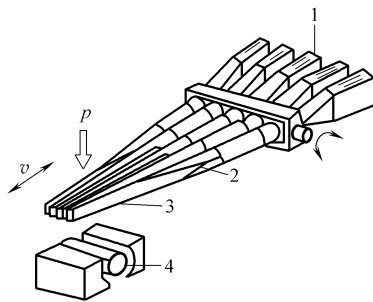


图 2-5-29 超声波线焊示意图

1—换能器 2—聚能器 3—125mm 长棒

接声极头 4—周围绕放罐型坯料的心轴

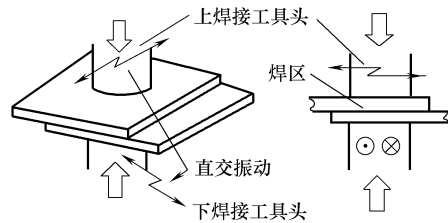
 v —振动方向 p —静压力

图 2-5-30 采用两个振动系统的超声波点焊示意图

6) 超声波对焊: 超声波对焊主要用于金属的对接, 是近年来开发的一种新方法, 焊接原理如图 2-5-32 所示, 焊接设备由上、下振动系统提供接触压力的液压源和焊件夹持装置等部分组成。左边焊件的一端由夹具固定, 另一端夹在上、下振动系统之间做超声波振动; 右焊件端面与左端面对接, 并由夹具夹紧, 接触压力加在右侧焊件上。焊接时, 在超声波振动的作用下即可把两个焊件在端面焊接在一起。应注意, 焊接装置的上、下振动系统的振动相位必须相反, 上振动系统可以是无源的。采用频率为 27kHz 的该类焊接装置可以焊接厚 6~10mm 的铝板、厚 6mm 的铜板和铝板的焊接。目前可以实现厚 6mm、宽 100~400mm 铝板的对接。

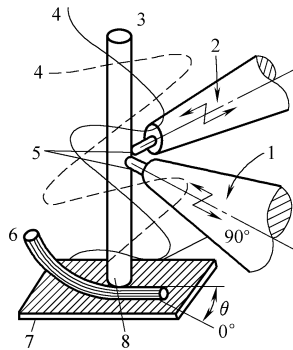


图 2-5-31 细导线超声波焊接装置

1—40kHz 纵振动系统 2—60kHz 纵振动系统

3—细棒 4—细棒中横振动分布曲线 5— $\lambda/4$

振动棒 6—铝线 7—铜板 8—焊头

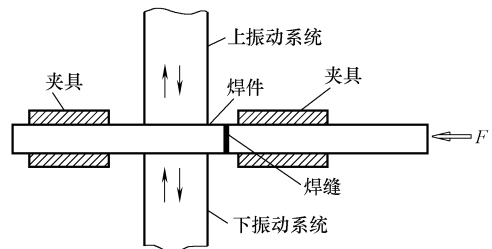


图 2-5-32 超声波对焊示意图

5.2.3 超声波焊的焊接接头设计

1. 焊点设计

超声波焊时,要求焊点强度必须达到一定的要求,需要设计出一种合理的焊点结构,同时还要保持外形尽可能美观。焊点分布如图 2-5-33 所示,对焊点与板材边缘的距离没有限制,可以沿边缘布置焊点,焊点之间的距离可以任意选定,可以重叠和重复焊接(修补),每行之间的距离也可以根据需要任选,不存在电阻点焊时的分流问题。

2. 焊接界面设计

为了在焊接过程中使能量集中,缩短焊接时间,提高焊接质量,焊接界面的设计非常重要,主要有以下几种形式。

(1) 导能三角形焊面 如图 2-5-34 所示,在两块塑料接面的一边,沿着焊面,加一条小三角形凸缘,将超声波振动聚集在三角的尖端,由此减小焊件的接触面积,而形成集中的超声波能量。焊接后,熔化的塑料均匀地流满接合面,并产生较强的结合力。应注意,材料的壁厚应小于 2.5mm,凸缘的高度应为板宽 W 的 1/10 左右。

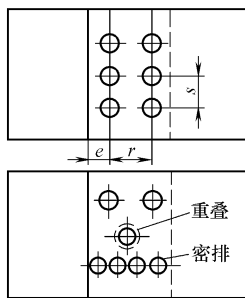


图 2-5-33 超声波点焊接头设计

e —边距 r —行距 s —点距

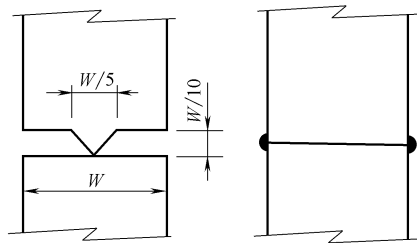


图 2-5-34 导能三角形焊面

(2) 台阶式焊面 为了提高焊接力,可设计成图 2-5-35 所示的台阶式焊接界面 (W 为板宽),三角形凸缘可以使凸缘材料熔化之后,流入预留的孔隙,能产生较大的切应力及抗拉强度,这种设计还可以避免在外表面上产生焊接痕迹。

(3) 凹凸插接式焊面 如图 2-5-36 所示,待焊接材料设计成带有三角形凸缘的凹凸形式,两焊件之间应留有间隙,凸形焊件应有一定的角度,以使塑料件容易拼合,同时让熔融的材料有流动的空间,不致溢出外面。

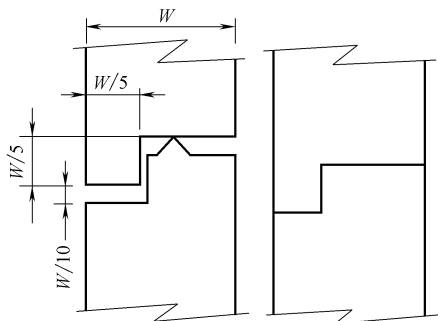


图 2-5-35 台阶式焊面

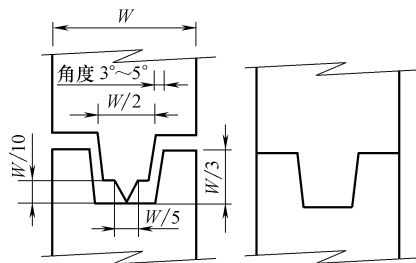


图 2-5-36 凹凸插接式焊面

(4) 剪切式焊面 不论矩形还是圆形零件，剪切式焊面都有高度密封效果。由于大量材料需要流动，要求超声波焊接设备具有高振幅及高输出能量，在焊面间应预留凹孔，以容纳适量的熔融塑料。如图 2-5-37 所示，两塑料件沿壁垂直相挤的结果，彻底消除缺口或缝隙，此种焊面特别适用于结晶组织而且有瞬熔特性的材料。当焊接深度等于壁厚的 1.25 倍时，接头强度最高。

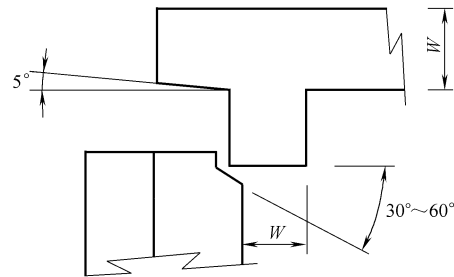


图 2-5-37 剪切式焊面

在超声波焊的接头设计中应注意控制工件的谐振问题。当上声极向工件引入超声波振动时，如果工件沿振动方向的自振频率与引入的超声波振动频率相等或相近，就有可能引起工件的谐振，其结果往往造成已焊焊点的脱落，严重时可导致工件的疲劳断裂，解决上述问题的简单方法就是改变工件与声学系统振动方向的相对位置或者改变工件的自振频率。

5.2.4 超声波焊的焊接参数选择

超声波焊的主要焊接参数有振动频率 f 、振幅 A 、静压力 p 及焊接时间 t ，此外还应考虑超声波功率的选择以及各参数之间的相互影响。在超声波焊接中，点焊应用得最普遍，下面以点焊为例讨论各参数对焊接质量的影响。

1. 超声波振动频率 f

振动频率主要是指谐振频率的数值和谐振频率精度。谐振频率一般为 15 ~ 75kHz，频率的选择应考虑被焊接材料的物理性能和厚度，焊件较薄时选用比较高的谐振频率，焊件较厚、焊接材料的硬度及屈服强度较低时选用较低谐振频率。这是由于在维持超声波功率不变的前提下，提高振动频率可以降低振幅，因而可降低薄焊件因交变应力引起的疲劳破坏。

振动频率对焊点抗剪强度有影响，如图 2-5-38 所示，材料越硬、厚度越大时，频率的影响越明显。应注意，随着频率的提高，高频振荡能量在声学系统中的损耗将增大，因此大功率超声波点焊机的频率比较低，一般在 15 ~ 20kHz。

谐振频率的精度是保证焊点质量稳定的重要因素，由于超声波焊接过程中机械负荷的多变性，会出现随机的失谐现象，造成焊接质量不稳定。

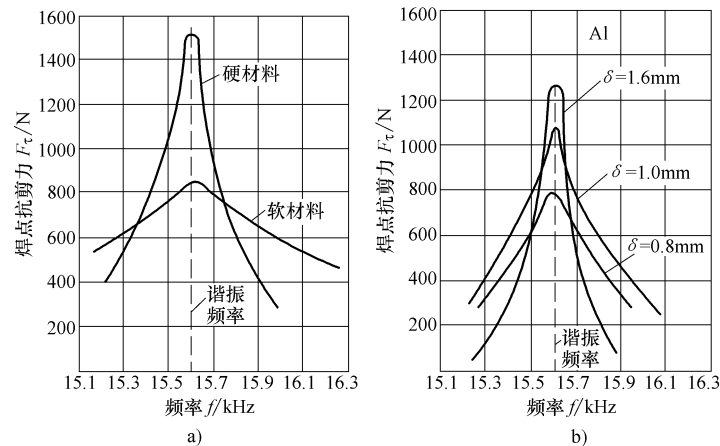


图 2-5-38 振动频率与焊点抗剪力的关系
a) 不同硬度的影响 b) 不同厚度的影响

2. 振幅 A

振幅是超声波焊接工艺中基本的参数之一,它决定着摩擦功率的大小,关系到焊接面氧化膜的去除、结合面的摩擦产热、塑性变形区域的大小及塑性流动层的状况等。因此,根据被焊接材料的性质及其厚度正确选择振幅的数值是获得高可靠接头的前提。振幅的选用范围一般为 $5 \sim 25 \mu\text{m}$,小功率超声波焊机一般具有高的振动频率,但振幅范围较低。低硬度的焊接材料或较薄的焊件应选用较低的振幅,随着材料硬度及厚度的提高,所选用的振幅也应相应提高。这是因为振幅的大小对应着焊件接触表面相对移动速度的大小,而焊接区的温度、塑性流动以及摩擦功的大小又由该相对移动速度所确定。

对于具体的焊件,存在一个合适的振幅范围,图 2-5-39 为铝镁合金在不同振幅值下焊点强度的试验结果。当振幅 A 为 $17 \mu\text{m}$ 时,焊点抗剪强度最大,振幅减小,强度随之降低。当振幅小于 $6 \mu\text{m}$ 时,已经不能形成接头,即使增加振动作用的时间也无效果,这是因为振幅值过小,焊件间相对移动速度过小所致。当振幅值超过 $17 \mu\text{m}$ 时,焊点强度反而下降,这主要与金属材料内部及表面的疲劳破坏有关,因为振幅过大,由上声极传递到焊件的振动剪力超过了它们之间的摩擦力,声极与工件之间发生相对的滑动摩擦,并产生大量的热和塑性变形,导致上声极嵌入焊件,使有效接合断面减少。

超声波焊机的换能器材料和聚能器结构决定焊机振幅的大小,当它们确定以后,要改变振幅,一般是通过调节超声波发生器的电参数来实现。此外,振幅值的选择与其他参数有关,应综合考虑。必须指出,在合适的振幅范围内,采用偏大的振幅可大大缩短焊接时间,提高焊接生产效率。

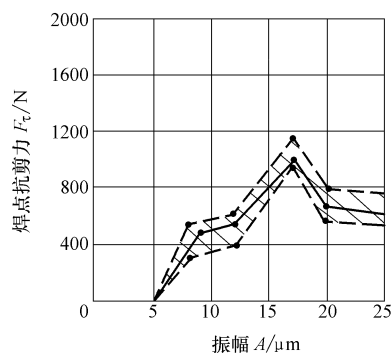


图 2-5-39 振幅与铝镁合金
焊点抗剪力的关系

3. 静压力 F

静压力的作用是通过声极使超声振动有效地传递给焊件,超声波焊接时所需静压力的大小根据材料的类型而不同,静压力和焊点抗剪强度之间的关系如图 2-5-40 所示。

当静压力过低时,由于超声波几乎没有被传递到焊件,不足以在焊件界面产生一定的摩擦功,超声波能量几乎全部损耗在上声极与焊件之间的表面滑动方面,因此不可能形成有效的连接。随着静压力的增加,改善了振动的传递条件,使焊区温度升高,材料的变形抗力下降,塑性流动的程度逐渐加剧,另外由于压应力的增加,接触处塑性变形的面积及连接面积增加,因而接头的强度增加。当静压力达到一定数值后,再增加压力,接头强度不再提高或反而下降,这是因为当静压力过大时,振动能量不能合理地利用,使摩擦力过大,造成焊件间的相对摩擦运动减弱,甚至会使振幅值有所降低,导致了焊件间的连接面积不再增加或有所减小,加之材料压溃造成接头的实际接合断面减少,使焊点强度降低。

在其他焊接条件不变的情况下,选用偏高的静压力,可以在较短的焊接时间内得到同样强度的焊点,这是因为偏高的静压力能在振动早期较低的温度下产生塑性变形。同时,选用偏高的静压力,能在较短的时间内达到最高的温度,缩短了焊接时间。

4. 焊接时间 t

焊接时间对接头质量有很大影响,焊接时间太短时,表面的氧化膜来不及被破坏,只形成几个凸点间的接触,则接头强度过低,甚至不能形成接头。随着焊接时间的延长,焊点强度迅速提高(图 2-5-40),在一定的焊接时间内强度值不降低。但当超声波焊接时间超过一定值以后,焊点强度反而下降,这是由于焊件的热输入过大,塑性区扩大,上声极陷入工件,除了降低焊点的断面面

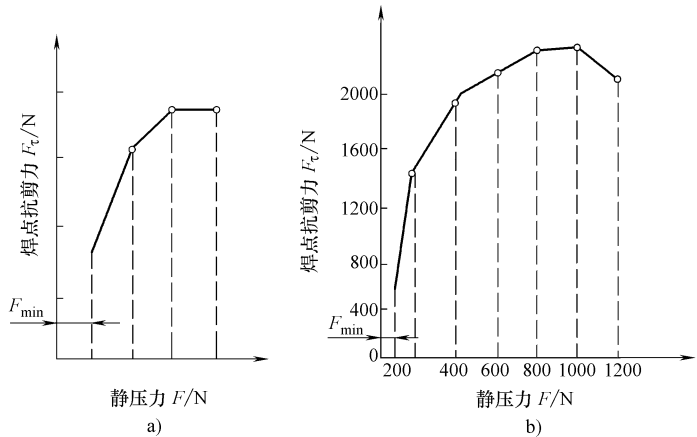


图 2-5-40 静压力与焊点抗剪力的关系
a) 纯铝 0.5mm b) 退火态硬铝 1.2mm

积以外，还容易引起焊点表面和内部裂纹。从图 2-5-41 中还可以看出，对于不同的静压力，获得接头最佳强度所需的焊接时间不同，增大静压力的数值，可在某种程度上缩短焊接时间。

5. 焊接功率 P

超声波焊时，功率的选择主要取决于工件的厚度和材料的硬度，由于在实际应用中超声波功率的测量尚有困难，因此常常用振幅来表示功率的大小，超声波功率与振幅的关系可用式 (2-5-2) 确定：

$$P = \mu SFv = \mu SF2A\omega / \pi = 4\mu SFAf \quad (2-5-2)$$

式中 P ——超声波功率；

F ——静压力；

S ——焊点面积；

v ——相对速度；

A ——振幅；

μ ——摩擦因数；

ω ——角频率 ($\omega = 2\pi f$)；

f ——振动频率。

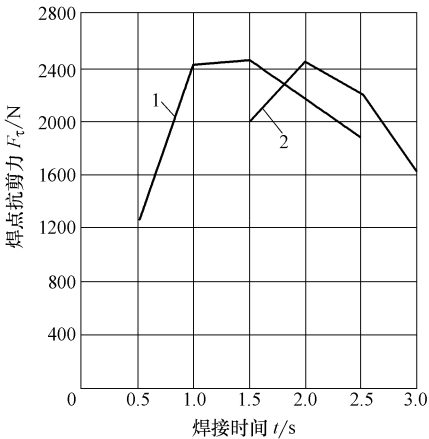


图 2-5-41 焊接时间对焊点抗剪力的影响
1—焊接静压力 1200N，振幅 23μm
2—焊接静压力 1000N，振幅 23μm

超声波焊时，振幅的选取范围为 5 ~ 25 μm，当换能器材料、结构及其功率选定后，振幅值大小还与聚能器的放大系数有关。

通常可以通过绘制临界曲线的方法来确定上述各种焊接参数的相互影响。图 2-5-42 为静压力与功率的临界关系曲线。一般选用最小可用功率时的静压力和比最小可用功率稍高一点的功率值进行实际焊接。

上述几个焊接参数之间并不是孤立的，而是相互影响、相互关联，应统筹考虑。例如，塑料超声波焊时，接头质量的好坏取决于换能器的振幅、所加压力及焊接时间等因素的相互配合。焊接时间 t 和焊头压力 F 是可以调节的，振幅由换能器和变幅杆决定，这三个量相互有最佳选择值。焊接能量超过合适值时，材料的熔化量大，产生较大的变形。若焊接能量太小，则不易

焊牢。

除了焊接参数以外，上声极材料、形状尺寸及其表面状态等因素也对焊接质量有影响。

5.2.5 常用材料的超声波焊

1. 塑料焊接

由于各种热塑性塑料的型号及性质不同，造成超声波塑料焊接的相容性和适应性存在较大差异，表 2-5-10 对各类塑料材料的焊接性进行了比较，黑方块表示两种塑料的焊接性好，容易进行超声波焊，圆圈表示在某些情况下可以实现焊接，空格表示两种塑料焊接性差，不宜进行焊接。表中所列仅作参考，因为树脂成分的变化可导致焊接结果产生差异。

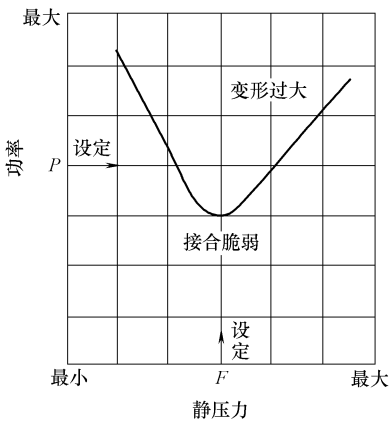


图 2-5-42 静压力与功率的临界曲线
P—功率 F—静压力

表 2-5-10 塑料的超声波焊接性比较

材料 焊接性 材料	ABS	ABS/聚 碳酸酯 合金(赛 柯乐 800)	聚甲 醛	聚丙 腈	丙稀 酸系 多元 共聚 物	丁二 烯-苯 乙烯	纤维 素(CA, CAB, CAP)	氟聚 合物	尼 龙	亚苯基- 氧化物 为主的 树脂(诺 里尔)	聚酰胺- 酰亚胺 (特朗)	聚碳酸 酯	热塑性 聚酯	聚乙 烯	聚甲 基戊 烯	聚苯 硫	聚丙 烯	聚苯 乙烯	聚砒	聚氯 乙烯	SAN- NAS- ASA
ABS	■	■		■	○															○	○
ABS/聚碳酸酯合金(赛柯乐 800)	■	■		○								■									
聚甲醛			■																		
聚丙腈	■	○		■	○					○		○									○
丙稀酸系多元共聚物	○			○	■													○			○
丁二烯-苯乙烯						■												○			
纤维素(CA, CAB, CAP)							■														
氟聚合物								■													
尼龙									■												
亚苯基-氧化物为主的树脂(诺里尔)				○						■		○							■	○	
聚酰胺-酰亚胺(特朗)											■										
聚碳酸酯		■		○						○		■								○	
热塑性聚酯													■								
聚乙烯														■							
聚甲基戊烯															■						
聚苯硫																■					
聚丙烯																	■				
聚苯乙烯					○	○				■								■			○
聚砒												○							■		
聚氯乙烯	○																			■	
SAN-NAS-ASA	○			○	○					○								○			■

注：■—表示相容，○—表示在某些情况下相容。

超声波焊接塑料一般采用图 2-5-43 所示的几种方法。

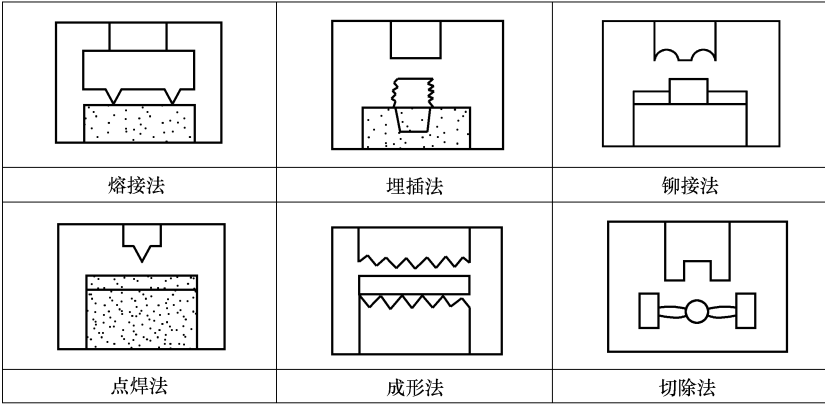


图 2-5-43 超声波焊接塑料常用的几种方法

- (1) 熔接法 超声波振动随焊头将超声波传导至焊件，由于两焊件处声阻大，因此产生局部高温，使焊件交界面熔化，在一定压力下，使两焊件达到美观、快速、坚固的熔接效果。
- (2) 埋插法 该方法可以将螺母或其他金属件插入塑胶工件内，首先将超声波传至金属（或螺母），经高速振动，使金属物（螺母）直接埋入成形塑胶内，同时将塑胶熔化，其固化后完成埋插。
- (3) 铆接法 将金属和塑料或两块性质不同的塑料接合时可利用超声铆接法，与热熔法相比，焊件不易脆化，外表美观。
- (4) 点焊法 利用小型焊头将两块大型塑料制品分点焊接，或整排齿状的焊头直接压于两件塑料工件上，实现超声波焊。
- (5) 成形法 利用超声波将塑料工件瞬间熔化成形。
- (6) 切除法 利用特殊设计的焊头及底座，当塑料工件注射成形时，直接压于塑料的切除部位，通过超声波传导而达到切除效果。

2. 金属材料的超声波焊

超声波焊可以实现同种金属材料和异种金属材料的可靠连接，根据国内外资料介绍，能够进行超声波焊的纯金属组合如图 2-5-44 所示。超声波焊接金属材料时，最常用的方法是点焊。利用超声波焊接不同厚度的组合焊件时，超声振动应从较薄的焊件一侧导入，焊接参数也是根据薄焊件的厚度来确定。

(1) 同种材料的焊接

1) 铝及其合金的超声波点焊的焊接参数见表 2-5-11（超声波振动频率的变化范围为 19.5 ~ 20.0kHz，振动头的球形半径均为 10mm），接头的抗拉强度见表 2-5-12，表中焊点的平均直径等于 4mm。图 2-5-45 是纯铝焊点的金相组织，接头中显示出强烈的塑性流动组织，原因是通过金属界面间摩擦所破坏的氧化铝膜

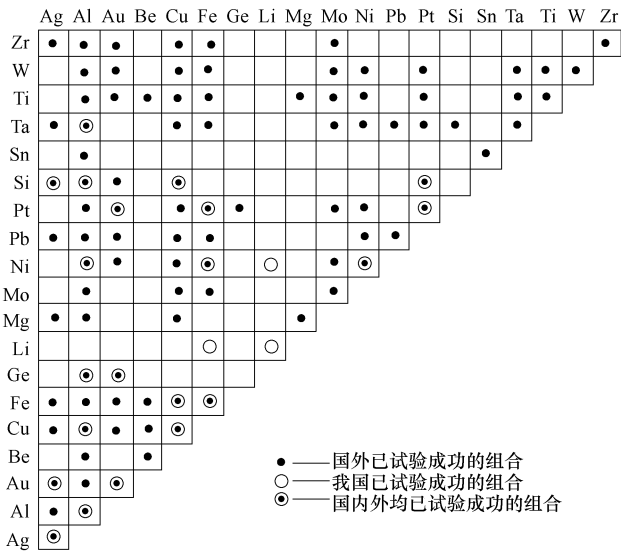


图 2-5-44 能进行超声波焊的纯金属组合

以旋涡状被排除在焊点的四周，在结合面上没有熔化迹象，只是出现了局部的再结晶现象。

从铝合金焊点的疲劳强度来看，超声波焊的接头比电阻焊的接头优良，如图 2-5-46 所示，对于铝铜合金约提高了 30%。但是，对于铸造组织的合金材料，超声波焊点的疲劳强度并不能得到显著改善。

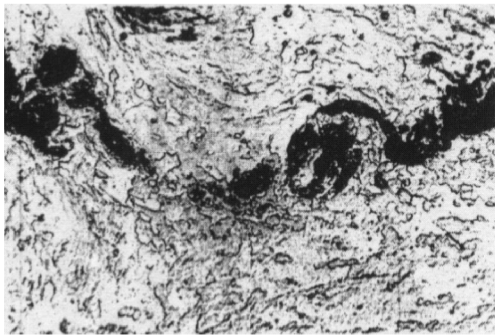


图 2-5-45 纯铝焊点显微组织 (500 ×)

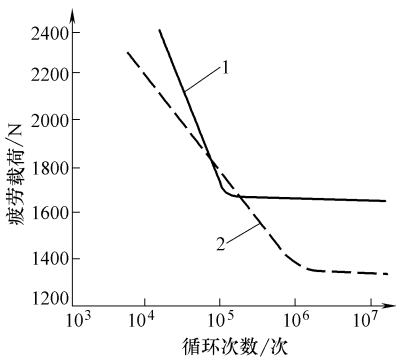


图 2-5-46 铝合金 (2024-T3) 焊点疲劳强度
1—超声波焊 2—电阻点焊

表 2-5-11 铝及其合金的超声波点焊的焊接参数

材料	厚度/mm	焊 接 参 数			振动头的材料	振动头材料的硬度 HV
		静压力 p/kg	时间 t/s	振幅 $A/\mu\text{m}$		
Al	0.3 ~ 0.7	20 ~ 30	0.5 ~ 1.0	14 ~ 16	45 钢	—
	0.8 ~ 1.2	35 ~ 50	1.0 ~ 1.5	14 ~ 16	45 钢	160 ~ 180
	1.3 ~ 1.5	50 ~ 70	1.5 ~ 2.0	14 ~ 16	45 钢	—
5A06	0.3 ~ 0.5	30 ~ 50	1.0 ~ 1.5	17 ~ 19	45 钢	160 ~ 180
5254	0.6 ~ 0.8	60 ~ 80	0.5 ~ 1.0	22 ~ 24	45 钢	160 ~ 180
2024-O	0.3 ~ 0.7	30 ~ 60	0.5 ~ 1.0	18 ~ 20	GCr15	330 ~ 350
	0.8 ~ 1.0	70 ~ 80	1.0 ~ 1.5	18 ~ 20	—	—
	1.1 ~ 1.3	90 ~ 100	2.0 ~ 2.5	18 ~ 20	—	—
	1.4 ~ 1.6	110 ~ 120	2.5 ~ 3.5	18 ~ 20	—	—
2024-T6	0.3 ~ 0.7	50 ~ 80	1.0 ~ 2.0	20 ~ 22	Gr15	330 ~ 350
	0.8 ~ 1.0	90 ~ 110	2.0 ~ 2.5	20 ~ 22	—	—
	1.1 ~ 1.3	110 ~ 120	2.5 ~ 3.0	20 ~ 22	—	—
	1.4 ~ 1.6	130 ~ 160	3.0 ~ 4.0	20 ~ 22	—	—
经过阳极处理的 2024	0.4	50	1.0	22 ~ 24	Gr15	330 ~ 350
	0.6	60	1.25	22 ~ 24	—	—
	0.8	80	1.0	22 ~ 24	—	—
	1.0	100	2.0	22 ~ 24	—	—

表 2-5-12 铝及其合金超声波点焊接头的抗剪强度

牌号	厚度/mm	破坏载荷 F_r/N			试验件数量	接头的破坏特点
		最小	最大	平均		
Al	0.5	430	550	530	15	断裂
	1.0	970	1080	1030	9	断裂
	1.5	1300	1650	1500	10	断裂
5A06	0.5	970	1200	1090	5	断裂
5254	0.8	910	1320	1080	7	断裂
2024-O	0.5	620	800	720	9	断裂
	1.0	2090	2290	2200	7	断裂
	1.2	2330	2730	2500	15	断裂
	1.5	2140	2560	2360	6	断裂

(续)

牌号	厚度/mm	破坏载荷 F_T /N			试验件数量	接头的破坏特点
		最小	最大	平均		
2024-T6	0.8	1400	1540	1460	5	断裂
	1.0	1370	2180	1630	9	断裂
	1.5	1600	1720	1700	4	断裂
经过阳极处理的2024	0.4	470	680	590	6	断裂
	0.6	1030	1200	1100	7	断裂
	0.8	144	1620	1530	5	剪断
	1.0	1720	2010		7	剪断

2) 铜及其合金的焊接性好, 焊前需要对表面进行清洗, 去除油污, 焊接参数和设备选择与铝合金相似, 表 2-5-13 是铜 T2 的焊接参数, 接头的抗剪强度见表 2-5-14, 表中焊点的平均直径等于 4mm。在电机制造尤其是微电机制造中, 超声波点焊方法正在逐步替代原来的钎焊及电阻焊方法, 几乎所有的连接工序都可用超声波焊来完成, 包括通用电枢的铜导线连接, 换向器与漆包导线的连接, 铝励磁线圈与铝导线焊接以及编织导线与碳刷之间的焊接等。

3) 钛及其合金和锆也都具有很好的焊接性, 焊接参数的选择范围比较宽, 表 2-5-15 是钛及其合金和锆的焊接参数及点焊接头的强度。

4) 纯镍和镍合金具有好的焊接性, 不锈钢在冷作硬化或淬火状态下的超声波焊接性也比较好, 表 2-5-16 是两类材料的超声波点焊接头的抗剪强度。

5) 高熔点钨、钼、钽等材料, 由于其特殊的物理化学性能, 超声波焊接性比较差, 必须采用相应的措施, 如振动头和工作台需用硬度较高和耐磨性好的材料制造, 选择的焊接参数也应适当偏高, 特别是振幅值及施加的静压力应取高值, 选取较短的焊接时间。高硬度金属材料之间或焊接性较差的金属材料之间的焊接, 可通过添加中间层的方法实现超声波焊, 中间层材料一般选取软金属箔片。例如使用 0.062mm 的镍箔片作为过渡层, 将 0.62mm 的钼板与钼板之间进行焊接, 接头的抗剪力可达 2400N。通过 0.025mm 厚的镍箔片作过渡层, 可将 0.33mm 厚的镍基高温合金相互焊上, 焊点抗剪力为 3500N。

表 2-5-13 铜 T2 的超声波焊接参数

厚度/mm	焊接参数			振动工作头		
	静压力 p /N	时间 t /s	振幅 $A/\mu\text{m}$	球形半径 r /mm	材料	硬度 HV/MPa
0.3~0.6	300~700	1.5~2	16~20	10~15	Cr. 45	1600~1800
0.7~1.0	800~1000	2~3	16~20	10~15	Cr. 45	1600~1800
1.1~1.3	1100~1300	3~4	16~20	10~15	Cr. 45	1600~1800

表 2-5-14 铜 T2 的超声波点焊接头抗剪强度

厚度/mm	破坏载荷 F_T /N			试验的试件数	焊点的破坏特点
	最小	最大	平均		
0.5(单点)	1020	1220	1130	6	断裂
0.5(双点)	2600	2750	2670	4	两焊点全部断裂
1.0	2100	2360	2240	4	局部断裂

表 2-5-15 钛、钛合金及锆的焊接规范与点焊接头的强度

焊件材料	厚度/mm	焊接参数			振动头材料	焊点直径 d /mm	破坏载荷 F_T /N			试样数量	接头的破坏特点
		静压力 p /N	时间 t /s	振幅 $A/\mu\text{m}$			最小	最大	平均		
AT3	0.2	400	0.3	16~18	60HRC ^①	2.5~3	680	820	760	5	断裂
AT3	0.25	400	0.25	16~18	60HRC ^①	2.5~3	700	830	730	5	断裂
AT4	0.25	400	0.25	16~18	60HRC ^①	2.5~3	690	990	810	4	断裂

(续)

焊件材料	厚度/mm	焊接参数			振动头材料	焊点直径 <i>d</i> /mm	破坏载荷 F_T /N			试样数量	接头的破坏特点
		静压力 <i>p</i> /N	时间 <i>t</i> /s	振幅 <i>A</i> /μm			最小	最大	平均		
AT4	0.5	600	1.0	18~20	60HRC ^①	2.5~3	1770	1930	1840	4	剪断
AT3	0.65	800	0.25	22~24	60HRC ^①	3.0~3.5	3960	4200	4100	4	断裂和剪断
TB1	0.5	800	0.5	20~22	BK-20	3	1930	2080	2000	4	断裂
	1.8	900	1.5	22~24	60HRC ^①	3.0~3.5	3090	3440	3300	4	断裂和剪断
	1.0	1200	1.5	18~20	BK—20	3	2800	3080	2930	3	局部断裂
Zr	0.5	900	0.25	23~25	BK—20	3	600	840	700	12	断裂
TB1 + Zr	0.5 + 0.5	900	0.25	23~25	BK—20	3	560	820	670	9	断裂

①振动头上带有用 T590 焊条堆焊的硬质堆焊层。

表 2-5-16 镍、钢超声波点焊接头的抗剪强度

材 料	牌 号	工件厚度/mm	平均抗剪强度 σ_T /MPa
镍	因康镍 X-750	0.8	67.6 ± 4.5
	蒙乃尔 K-500	0.8	40.0 ± 2.7
	雷诺 Rnenc41	0.5	16.9
	钽弥散硬化型	0.64	40.5
钢	AISI-1020	0.6	22.3 ± 0.9
	A-286	0.3	30.3 ± 3.1
	Am-350	0.2	13.9 ± 0.9
	Am-355	0.2	16.9 ± 1.8

(2) 异种材料及新材料的焊接 对于不同性质的金属材料之间的超声波焊的焊接质量，决定于两材料的硬度。两种材料的硬度越接近，超声波焊的质量就越好。硬度相差悬殊的两种材料焊接时，当其中一种材料的硬度较低、塑性较好时，可以形成高质量的接头。如果两种被焊接材料的塑性都较低，可采用中间层进行焊接。不同硬度的金属材料焊接时，硬度低材料置于上面，使其与上声极相接触，焊接参数及焊机功率按照上焊件选取。不同厚度的金属材料也有很好的超声波焊接性，焊件的厚度比没有限制。例如可将热电偶丝焊到被测温度的厚大物件上，对于厚度比为 1000 的 25μm 的铝箔与 25mm 的铝板之间的超声波焊也可以顺利实现，能够得到优质接头。异种金属焊接时，接头组织比较复杂，图 2-5-47 是镍与铜的超声波焊的接头组织，较软的铜以犬牙交错的形式嵌入了镍材中，并在界面形成了固相连接。

超声波焊可以在玻璃、陶瓷或硅片的热喷涂表面上连接金属箔及金属丝，把两种物理性能相差悬殊的材料制成双金属接头，以满足微电子器件等行业的需求，表 2-5-17 列出了双金属接头的实例。



图 2-5-47 镍与铜超声波焊点显微组织 (250 ×)

表 2-5-17 超声波焊适用的双金属接头

材料 A	材料 B
铝及其合金	铜、锆、金、科伐铁-镍-钴合金 钼、镍、铂、硅、钢、铅、镁、铍、铁、不锈钢、 镍铬合金丝,康铜丝
	金、科伐铁-镍-钴合金、镍、铂、钢、锆
铜	金、科伐铁-镍-钴合金、镍、铂、钢、锆
金	锆、科伐铁-镍-钴合金、镍、铂、硅
钢	钼、铅
镍	科伐铁-镍-钴合金、钼
铅	钼

超声波焊广泛应用于电子工业中微电子器件的互连、晶体管芯的焊接、晶闸管控制极的焊接以及电子器件的封装等,最成功的应用是集成电路元器件的互连。例如,在 1mm^2 的硅片上,有数百条直径为 $25\sim 50\mu\text{m}$ 的Al或Au丝通过超声波焊将接点部位互连起来。互连质量及成品率是集成电路制造工艺中的关键,超声波焊和超声波与热压相结合的热声键合法逐步取代了早期应用的热键合方法(又称金丝球法)。目前在装配线上应用的超声波点焊机的功率为 $0.02\sim 2\text{W}$,频率为 $60\sim 80\text{kHz}$,压力为 $0.2\sim 2\text{N}$,焊接时间为 $10\sim 100\text{ms}$,焊接过程采用微机控制及图像识别系统,位置控制精度为每级 $2.5\sim 50\mu\text{m}$,识别容量为 $200\sim 250$ 点,识别时间为 $100\sim 150\text{ms}$,成品率已高于 $90\%\sim 95\%$ 。

超声波焊在电器工业中也获得广泛应用,如汽车电器中的多种热电偶,钽(或铝)电介电容器、涤纶电容器的生产中采用超声波点焊使成品率提高到近 100% 。图2-5-48为ODFPS2—25000/500型超高压变压器的屏蔽构件制作现场,共采用500个组件计有50000个焊点,结构中选用的铝屏蔽箔厚度为 0.06mm ,每个焊点的接地电阻值小于 0.7Ω 。

超声波焊在新材料工业中也获得广泛应用,例如超导材料之间以及超导材料与导电材料之间的焊接,在采用超声波焊及超声波浸润钎焊技术后,接头的电阻明显低于传统的软钎焊及加锡铂电阻焊,并已用于超导磁体的制作。

(3) 接头力学性能评价 超声波焊的焊接接头力学性能一般是通过剪切或拉伸试验的断裂特征来进行测定和评价。很多情况下超声波焊的工件是一些细丝、薄壁管、丝网等微型零件,因此,有时就像电阻焊一样用撕裂法来定性判断其接头的力学性能。

超声波焊点的抗剪强度常与电阻点焊的抗剪强度进行比较,一般情况下超声波焊的抗剪强度比电阻点焊的最低标准高。此外,超声波焊点抗剪强度的重复性特别好,焊点的平均剪力变化值小于 10% ,接头强度一般为母材强度的 $85\%\sim 100\%$ 。

由于超声波焊焊接接头的母材未发生熔化,因而焊点在耐介质腐蚀性能方面与母材几乎没有差别。

5.2.6 超声波焊焊接设备

1. 焊机型号及主要指标

超声波焊机根据能够焊接的接头形式可分为点焊机、缝焊机、环焊机和线焊机,但焊机的组成基本相同,主要包括超声波发生器、声学系统、加压机构、程控装置四大部分和附属部分(水冷系统、缝焊时的传动及变速机构等)。典型的焊机结构如图2-5-49所示,焊接设备外观如图2-5-50所示。表2-5-18是国产塑料超声波焊机的型号及其技术参数,表2-5-19是国产金属超声波焊机的型号及其技术参数。

2. 超声波焊接设备构成及功能

(1) 超声波发生器 超声波发生器用来将工频(50Hz)电流转换成超声频率($15\sim 60\text{kHz}$)的振荡电流,并通过输出变压器与换能器相匹配。

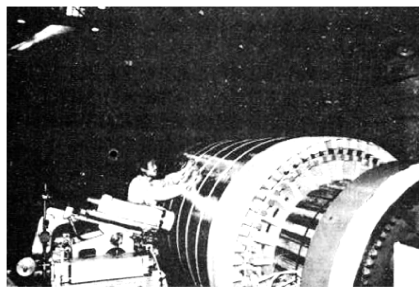


图2-5-48 超高压变压器铁心的屏蔽构件超声波点焊

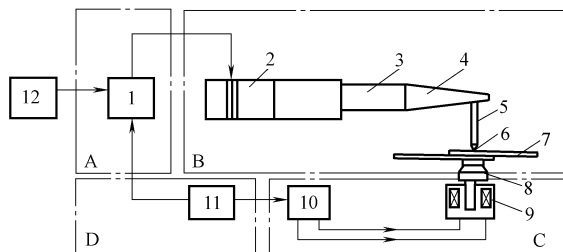


图2-5-49 超声波点焊机的典型结构

A—超声波发生器 B—声学系统 C—加压机构 D—控制装置
1—超声波发生器 2—换能器 3—传振杆 4—聚能器
5—耦合杆 6—上声极 7—工件 8—下声极 9—电磁
加压装置 10—控制加压电源 11—程控器 12—电源

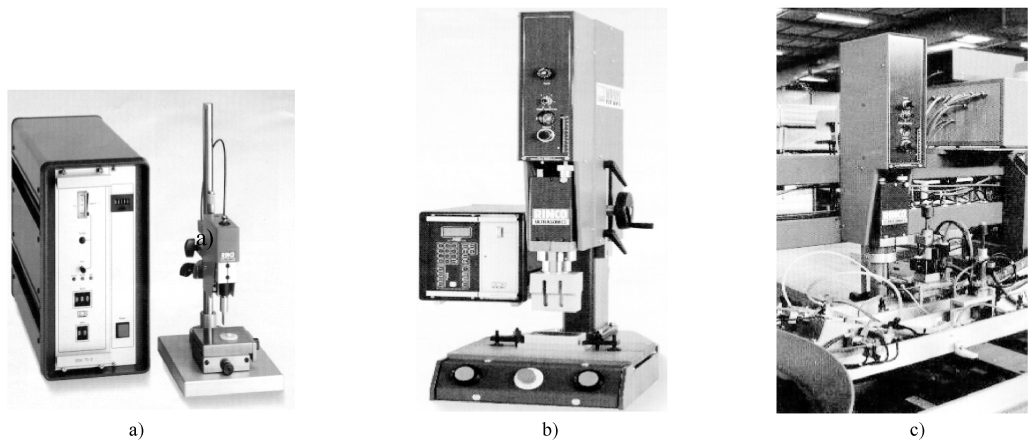


图 2-5-50 典型的超声波焊接设备

a) 微型超声波焊机 b) 计算机辅助超声波焊机 c) 超声波焊接生产线

表 2-5-18 国产塑料超声波焊机的型号及其技术参数

型号 规格	频率 /kHz	输出功率 /W	超声时间 /s	延时时间 /s	保压时间 /s	气动压力 /MPa	气缸行程 /mm
SCHJ-150	20 ± 1	150	0 ~ 5	—	—	0.3 ~ 0.6	
SCHJ-1000	20 ± 1	1000	0 ~ 5	0 ~ 5	0 ~ 5	0.3 ~ 0.6	75
SCHJ-1500	20 ± 1	1500	0 ~ 5	0 ~ 5	0 ~ 5	0.3 ~ 0.6	75
SCHJ-2000	20 ± 1	2000	0 ~ 5	0 ~ 5	0 ~ 5	0.3 ~ 0.6	75
SCHJ-500	40 ± 1	500	0 ~ 5	0 ~ 5	0 ~ 5	0.3 ~ 0.6	50
SCHJ-2400	15 ± 1	2400	0 ~ 5	0 ~ 5	0 ~ 5	0.3 ~ 0.6	100
生产厂家	中船重工集团公司第七二六研究所(上海船舶电子设备研究所)						

表 2-5-19 国产金属超声波焊机的型号及其技术参数

型号	发生器功率 <i>P</i> /W	谐振频率 <i>f</i> /kHz	静压力 <i>p</i> /N	焊接时间 <i>t</i> /s	焊接速度 <i>v</i> /(m/min)	可焊工件厚度 /mm
CHJ-28 点焊机	0.5	45	15 ~ 120	0.1 ~ 0.3	—	30 ~ 120 μm
KDS-80 点焊机	80	20	20 ~ 200	0.05 ~ 6.0	0.7 ~ 2.3	0.06 + 0.06
SD-0.25 缝焊机	250	19 ~ 21	15 ~ 100	0 ~ 1.5	—	0.15 + 0.15
SE-0.25 缝焊机	250	19 ~ 21	15 ~ 180	—	0.5 ~ 3	0.15 + 0.15
P1925 点焊机	250	19.5 ~ 22.5	20 ~ 195	0.1 ~ 1.0	—	0.25 + 0.25
P1950 点焊机	500	19.5 ~ 22.5	40 ~ 350	0.1 ~ 2.0	—	0.35 + 0.35
CHD-1 点焊机	1000	18 ~ 20	600	0.1 ~ 3.0	—	0.5 + 0.5
CHF1 缝焊机	1000	18 ~ 20	500	—	1 ~ 5	0.4 + 0.4
CHF-3 缝焊机	3000	18 ~ 20	600	—	1 ~ 12	0.6 + 0.6
SD-5 点焊机	5000	17 ~ 18	4000	0.1 ~ 0.3	—	1.5 + 1.5

发生器有电子管放大式、晶体管放大式、晶闸管逆变式及晶体管逆变式等多种电路形式。其中电子管式性能稳定可靠，功率较大，但效率低，仅为 30% ~ 45%，已经逐步被晶体管放大式所代替。晶体管逆变式超声波发生器采用了大功率的 CMOS 器件和微型计算机控制，体积小、可靠性高和控制灵活。

超声波发生器必须与声学系统相匹配，才能使系统处于最佳状态，获得高效率的输出功率。由于超声波焊接时机械负载往往有很大变化，换能元件的发热也容易引起材料物理性能的变化，换能器的温度波动，容易引起谐振频率的变化，从而影响焊接质量。因此，在超声波发生器作为焊接应用时，频率的自动跟踪是一个必备的功能，利用取自负载的反馈信号，构成发生器的自激状态，以

确保自动跟踪和最优的负载匹配。有些发生器还装有恒幅控制器,以确保声学系统的机械振幅保持恒定。最近几年出现的晶体管逆变式发生器使超声波发生器的效率提高到95%以上,而设备的体积大幅度减小。

(2) 声学系统 声学系统由换能器、传振杆、聚能器、耦合杆和声极组成。

1) 换能器:换能器的作用是将超声波发生器的电磁振荡(电磁能)转变成相同频率的机械振动(机械能),它是焊机的机械振动源。常用的换能器有压电式及磁致伸缩式两种。

石英、锆酸铅、锆钛酸铅等压电晶体,在一定的结晶面受到压力或拉力时将会出现电荷,称为压电效应;当在压电轴方向馈入交变电场时,晶体就会沿着一定方向发生同步的伸缩现象,即逆压电效应。超声波换能器就是利用压电晶片的逆压电效应制成的,其主要优点是效率高和使用方便,一般效率可达80%~90%。压电换能器的缺点是比较脆弱,使用寿命较短。

磁致伸缩换能器是利用镍或铁、铝合金等材料的磁致伸缩效应而工作的器件,它虽然工作稳定可靠,但由于效率仅为20%~40%,目前已被压电式换能器所取代。

2) 传振杆:超声波焊的传振杆是与压电式换能器配套的声学器件,一般由45钢、30CrMnSi低合金或超硬铝合金制成,主要用来调整输出负载、固定系统以及方便实际使用。传振杆通常选择放大倍数为0.8、1、1.25等几种半波长阶梯型杆。

3) 聚能器:聚能器又称变幅杆,其作用是将换能器所转换成的高频弹性振动能量传递给焊件,以便调节换能器和负载的参数。此外,在声学系统中还具有放大换能器的输出振幅和集中能量的作用。

在设计聚能器时,主要应使其谐振频率等于换能器的振动频率,并在结构上考虑合适的放大倍数、低的传动损耗以及自身具备足够的强度。图2-5-51是聚能器的结构形式,阶梯形的聚能器放大系数最大,而且加工方便,但其共振范围小,断面的突变处应力集中大,只能适用于小功率焊机。圆锥形聚能器有较宽的共振频率范围,但放大系数最小。指数形聚能器的放大系数小,强度大,加工简单,在超声波焊机中得到广泛应用。

聚能器工作在疲劳条件下,设计时应重点考虑结构的强度,特别注意声学系统各个组元的连接部位。用来制造聚能器的材料应有高的疲劳强度及小的振动损耗,目前常用的材料有45钢、30CrMnSi低合金钢、高速钢、超硬铝合金及钛合金等。

4) 耦合杆:耦合杆用于振动能量的传输及耦合,将聚能器输出的纵向振动改变为弯曲振动。耦合杆在结构上非常简单,通常都是一个圆柱杆,但其工作状态较为复杂,设计时除了根据谐振条件来设计耦合杆的自振频率外,还可以通过波长数的选择来调整振动振幅的分布,以获得最优的工艺效果。材料选择上应与制造聚能器的材料相同,两者用钎焊的方法连接起来。

5) 声极:声极是直接于工件接触的部件,分为上声极和下声极。声极的结构与焊机类型有关,对于超声波点焊机来说,可以用各种形式的声极与聚能器或耦合杆相连接;缝焊机的上、下声极应设计成一对滚盘;塑料用焊机的上声极,其形状可根据零件的形状而改变。但是,无论是哪一种声极,在设计中的基本问题仍然是自振频率的设计。

通用超声波点焊机的上声极是一个简单的球面,其曲率半径约为可焊工件厚度的50~100倍。例如,对于可焊1mm工件的焊机,其上声极端面的曲率半径可选75mm。缝焊机的滚盘按其工作状态进行设计,选择弯曲振动状态时,滚盘的自振频率应设计成与聚能器频率一致。

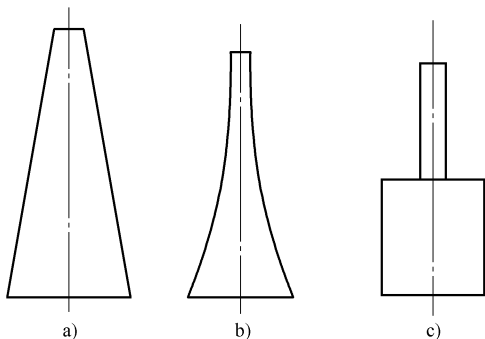


图2-5-51 聚能器的结构形式

a) 圆锥形 b) 指数形 c) 阶梯形

与上声极相反,下声极在设计时应选择反谐振状态,从而使谐振能可以在下声极表面反射,以减少能量的损失。有时为了简化设计或受工件条件限制也可选择大质量的下声极。

(3) 加压机构 加压是形成焊接接头的必要条件,目前常用的加压方式主要有液压、气压、电磁加压及自重加压等。其中液压方式冲击力小、主要用于大功率焊机,小功率焊机多采用电磁加压或自重加压方式,这种方式可以匹配较快的控制程序。实际中的加压机构还可能包括工件的夹持机构,如图 2-5-52 所示。

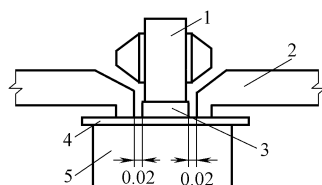


图 2-5-52 工件夹持结构

1—声学头 2—夹紧头 3—丝（焊件之一） 4—工件 5—下声极

(4) 程控装置 超声波焊机的程控装置（也称焊接控制系统）主要是实现超声波的焊接过程控制,如加压及压力大小控制、焊接时间控制、维持压力的时间控制等。目前的焊接程控装置多采用微计算机或工控机进行控制。

5.3 爆炸焊

爆炸焊（Explosive Welding, EW）是以炸药作为能源,利用爆炸时产生的冲击力,使焊件发生剧烈碰撞、塑性变形、熔化及原子间相互扩散,从而实现连接的一种压焊方法。

5.3.1 爆炸焊的基本原理

1. 爆炸焊的基本类型

爆炸焊是美国的卡尔（L. R. Carl）在 1944 年提出的,他在一次炸药爆炸试验中偶然发现,两片直径约 1in、厚度为 0.035in（1in = 25.4mm）的黄铜圆薄片,由于受到爆炸的突然冲击而被焊在一起。1957 年,美国的弗立普杰克（V. Phllipchuk）第一次把爆炸焊技术引入到工业工程应用上,在美国成功地实现了铝与钢的爆炸焊接。此后经过各国的不断努力,爆炸焊技术已经得到广泛应用。我国 1968 年大连造船厂陈火金等人试制成功国内第一块爆炸焊复合板。

爆炸焊主要用于金属复合板材、异种材料（异种金属、陶瓷与金属等）过渡接头以及爆炸压力成形加工等方面,一般采用接触爆炸,将炸药直接置于待焊试件的表面,有时为了保护表面的质量,可在炸药与待焊试件间加入一缓冲层。

爆炸焊的分类方法有多种,主要有以下几种:

1) 按接头形式不同分为面爆炸焊、线爆炸焊和点爆炸焊,其中线爆炸焊和点爆炸焊在实际中应用较少,面爆炸焊是爆炸焊的主要类型。

2) 按装配方式可分为平行法和角度法,如图 2-5-53 所示,平行法是将两试件平行放置,预留一定的间距,爆炸焊时试件随炸药爆炸的推进依次形成连接,接头各处的情况基本相同。角度法是使两试件间存在一个夹角,由两试件间距离较近处开始起焊,依次向距离较远处推进,由于距离不能过大,故试件的尺寸也不能太大。

3) 按试件是否预热可分为热爆炸焊和冷爆炸焊。热爆炸焊是将常温下脆性值较小的金属材料加热到它的脆性转变温度以上后,立即进行爆炸焊。例如钼在常温下的脆性值很小,爆炸焊后脆裂,将其加热到 400℃（脆性转变温度）以上时钼不再脆裂,

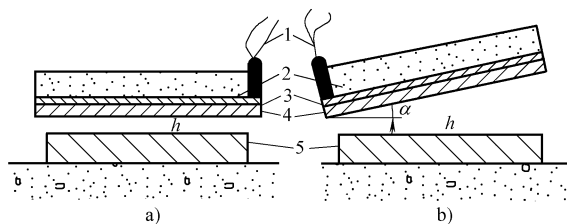


图 2-5-53 复合板的爆炸焊装配方式示意图

a) 平行法 b) 角度法

1—雷管 2—炸药 3—缓冲层 4—覆板 5—基板

α —安装角 h —间隙

并能和其他金属焊在一起。冷爆炸焊是将塑性太高的金属（如铅）置于液氮中，待其冷硬后取出，立即进行爆炸焊。

此外，按爆炸的次数可分为一次、两次和多次爆炸焊；按爆炸焊进行的地点可分为地面、地下、水中、空中和真空爆炸焊；按炸药分布可分为单面爆炸焊和双面爆炸焊。

2. 爆炸焊原理

(1) 爆炸焊的一般原理 爆炸焊是一个动态焊接过程，图 2-5-54 是典型的爆炸焊过程示意图，在爆炸前覆板与基板有一预置角（又称安装角） α ，炸药用雷管引爆后，以恒定的速度 v_d （一般为 $1500 \sim 3500 \text{ m/s}$ ）自左向右爆轰。炸药在爆炸瞬间释放的化学能量将产生一高压（高达 700 MPa ）、高温（局部瞬时温度高达 3000°C ）和高速（ $500 \sim 1000 \text{ m/s}$ ）冲击波，该冲击波作用到覆板上，使覆板产生变形，并猛烈撞击基板，其斜碰撞速度可达 $200 \sim 500 \text{ m/s}$ （撞击角 β 保持在 $7^\circ \sim 25^\circ$ ）。在碰撞作用下，撞击点处的金属可看做无黏性的流体，在基板与覆板接触点的前方形成射流，射流的冲刷作用清除了焊件表面的杂质和污物，去除了金属表面的氧化膜和吸附层，使洁净的表面相互接触。在界面两侧的纯净金属发生塑性变形的过程中，冲击动能转换成热能，使界面附近的薄层金属温度升高并熔化，同时，在高温、高压作用下这一薄层内的金属原子相互扩散，形成金属键，冷却后形成牢固的接头。有资料指出，优质爆炸复合是在极短的时间（ μs 级）内完成的，因此其复合界面几乎不存在或者说只存在程度很小（ $10^{-1} \mu\text{m}$ 量级）的扩散，所以可以避免脆性金属间化合物的形成，从而可实现钛-钢、锆-钢、钼-钢等异种金属的复合。

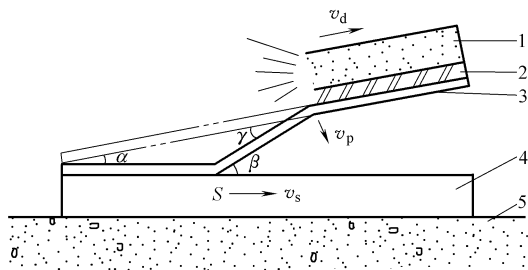


图 2-5-54 爆炸焊过程示意图

1—炸药 2—保护层 3—覆板 4—基板 5—地面

v_d —炸药的爆轰速度 v_p —覆板向基板的运动速度

v_s —撞击点 S 的移动速度（焊接速度） α —安装角

β —撞击角

(2) 接头形成特点。随着爆炸焊条件的不同，接头的结合面可有以下不同形式：

1) 平坦界面。该类界面的特点是界面上可见到平直、清晰的结合线，基体金属直接接触和结合，没有明显的塑性变形或熔化等微观组织形态。形成这种结合特点的主要原因是撞击速度较低。

2) 波浪形界面。当撞击速度高于某一临界值时，接头的结合区呈现有规律连续波浪形状，如图 2-5-55 所示。界面形成或大或小的不连续漩涡区，高倍显微组织可以看到微米级的熔化金属薄层，并且在不同强度和不同特性的爆炸载荷下，会产生不同形状和参数（波长、波幅和频率）的波形。

在爆炸焊大面积复合板的时候，有时界面上出现大面积金属熔化的现象，这种宏观现象体现在微观形态上，即呈现出图 2-5-55b 所示的规则和不规则连续熔化型结合区。

有些爆炸焊接头的结合面不仅具有不规则的波浪形微观形态，又有大大小小的不连续的金属熔化块，结合区为不规则的混合型结合形态，如图 2-5-55c 所示。

不同的焊接条件将影响结合区的形态，当撞击速度低于某一临界值（该值因不同金属组合而异）时，结合区多为平坦界面，在这类焊缝中很少或根本不发生熔化，有些接头也具有满意的力学性能，但由于对焊接参数的微小变化非常敏感，导致接头质量不稳定和易造成未结合缺陷，因此这种结合形式在实际生产中并不采用。当撞击速度高于某一临界值时，将会得到波浪形结合区，其接头性能优于平坦界面结合，并允许焊接参数的变化范围较宽。当撞击条件（覆板速度、撞击速度和撞击角度）过度，将会形成连续熔化层的结合面。这时，由于大量致密性缺陷（缩松、缩孔等）的形成，接头的强度、塑性均将降低，这种结合应尽量避免。

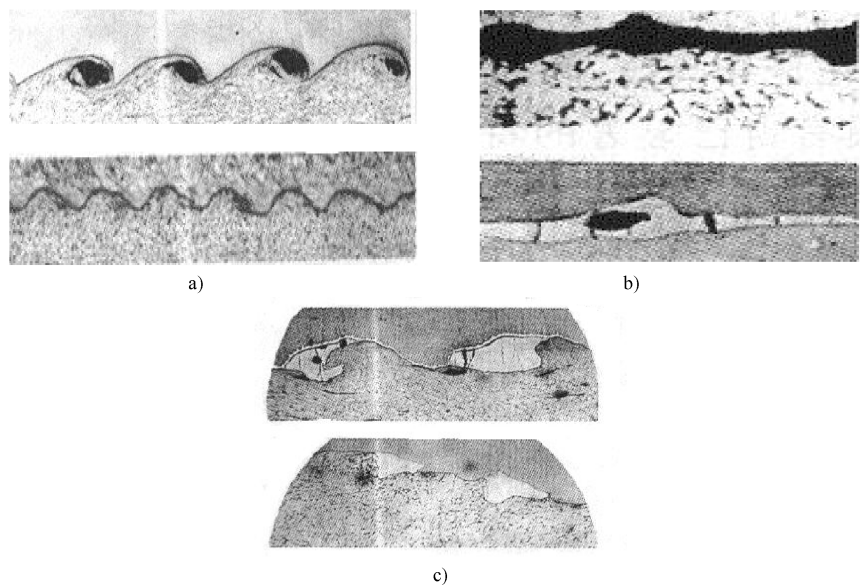


图 2-5-55 爆炸焊接结合区特征
a) 波形结合区 b) 连续熔化型结合区 c) 混合型结合区

5.3.2 爆炸焊工艺

1. 工艺特点

(1) 材料的焊接性 爆炸焊主要用于同种金属材料、异种金属材料、金属和陶瓷的焊接，特别是材料性能差异大而用其他方法难以实现可靠焊接的金属（如铝和钢、铝和钽等）、线膨胀系数相差很大的材料（钛和钢、陶瓷和金属等）、活性很强的金属（如钽、锆、铌等）。实际上，任何具有足够强度和塑性并能承受工艺过程所要求的快速变形的金属，都可以进行爆炸焊，图 2-5-56 是可成功实现爆炸焊的金属及合金组合。

(2) 接头形式 按焊件的类型不同，可分为板—板、管—管、管—板爆炸焊，其接头的形状及工艺装配如图 2-5-57 所示。按产品和工艺要求，接头形式主要可以分为对接和搭接两种。基板与覆板厚度的比值称为基覆比，该值一般不小于 1，且该值越大，即基板与覆板的厚度比越大，爆炸焊的质量越容易保证。

1) 覆板焊接。即在某一金属基板上焊上另一种金属平板，如把不锈钢板、铜板、钛板、铝板等焊到普通的钢板上。目前焊到基板上的覆板最大尺寸可以达到 1.2m × 2m，厚度从 1mm 到 6mm 不等。

2) 管-管包焊。即在某种材料的管的内壁或外表面上，焊上另一种材料的薄金属管，如钢管与钛管、钛管与纯铜管、硬铝管与软

		锆	镁	钨 钼 钴 合金	铂	金	银	铌	钽	耐 蚀 合 金	钛	镍 合 金	铜 合 金	铝	不 锈 钢	合 金 钢	碳 钢
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
碳钢	16	●	●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
合金钢	15	●	●	●					●	●	●	●	●	●	●	●	●
不锈钢	14			●		●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●
铝	13		●				●	●	●		●	●	●	●	●	●	●
铜合金	12						●	●	●		●	●	●	●	●	●	●
镍合金	11		●		●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
钛	10	●	●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
耐蚀合金	9									●	●	●	●	●	●	●	●
钽	8					●		●	●								
铌	7				●			●									
银	6						●										
金	5																
铂	4				●												
钨钼钴合金	3																
镁	2		●														
锆	1	●															

图 2-5-56 可成功实现爆炸焊的金属及合金组合

铝管、铝管与钢管的焊接等。

3) 管与板的焊接。主要用于大型热交换器的焊接, 其次由于个别管子损坏而漏水, 也可通过爆炸焊方法把该管堵塞。

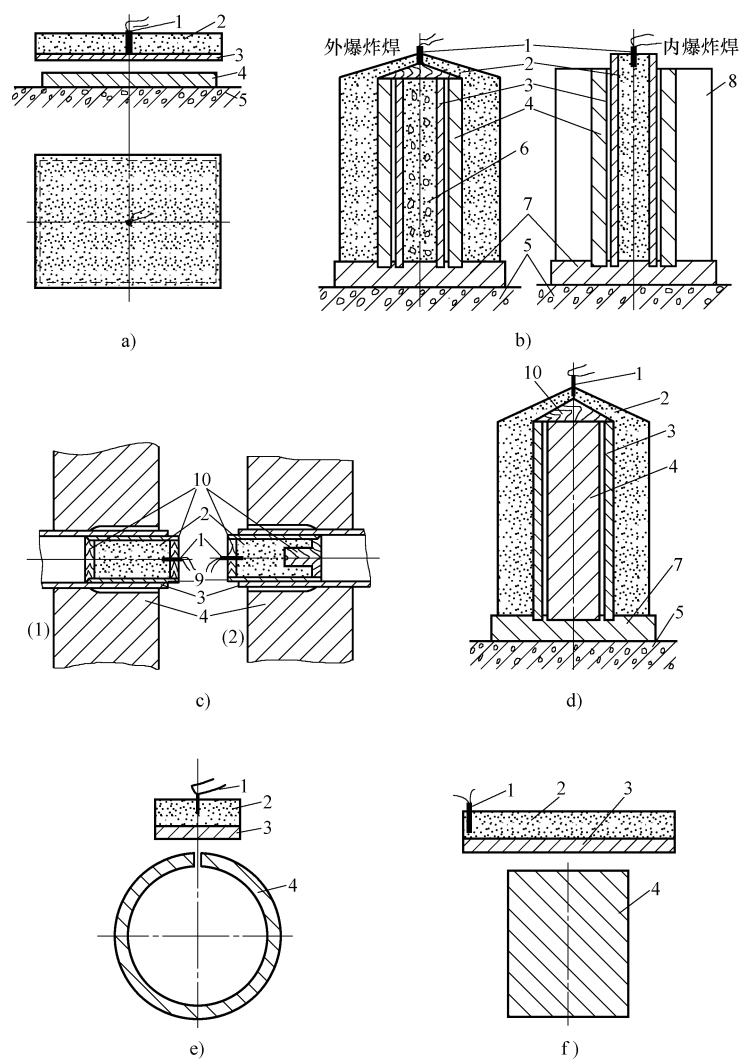


图 2-5-57 爆炸焊接头示意图

a) 板-板 b) 管-管 c) 管-管板 d) 管-棒 e) 板-管 f) 板-棒

1—雷管 2—炸药 3—覆层(管或板) 4—基层(板、管、管板或棒) 5—地面(基础)

6—低熔点或可溶性材料 7—底座 8—模具 9—塑料管 10—木塞

2. 爆炸焊工艺流程

1) 表面清理: 爆炸焊时, 试件对接表面必须平整, 无缺陷存在, 表面粗糙度 $Ra \leq 12.5 \mu\text{m}$ 。安装前应先将待焊面上的污物除去, 常用的清理方法有化学清洗、机械加工、打磨、喷砂和喷丸等。

2) 安放间隙柱: 为了保持基板和覆板之间的距离, 可用焊于基板四周的铁丝作支撑, 也可在两板之间安装立柱。安装立柱的操作过程是把基板和覆板安放到焊接基础后, 将覆板向上抬高一定距离, 将既定长度的间隙柱放置其中。在基板的边部每隔 200 ~ 500mm 放置一个间隙柱。在间隙柱安放之后, 如果复合板的面积不太大, 则两板之间就形成了以间隙柱长度为尺寸的间隙距离, 并且

这个距离在两板之间的任一位置都是相同和均匀的。但是,如果复合板的面积较大,间隙距离在两板的几何中心位置就可能很小,甚至贴合在一起。在这种情况下,除在基板边部放置间隙柱外,还应在基板的待结合面上均匀地放置一定数量、形状和尺寸的金属间隙物,以保证基板和覆板间的整个间隙距离。应注意,覆板的长度和宽度应比基板大5~10mm。

3) 涂抹缓冲保护层:将覆板在基板上支撑起来以后,用毛刷或滚筒将水玻璃或润滑脂涂抹在覆板的上表面(上表面将接触炸药),有时采用橡胶材料作缓冲层,这一薄层物质能起缓冲爆炸载荷和保护覆板表面免于氧化及损伤的作用。

4) 放置药框:把预先备好的木质或其他材质的炸药框放到覆板上,药框内缘尺寸比覆板的外缘尺寸稍小。

5) 布放主炸药:把药框安放好后,将主炸药用工具放入药框,应保证各处的药厚基本相同。

6) 布放高爆速的引爆炸药:为提高主炸药的引爆和传爆能力,在插放雷管的位置上布放50~200g的高爆速引爆炸药,引爆炸药也可在主炸药布放之前放到预定的位置上。

7) 安插雷管:引爆炸药和主炸药布放好后,将雷管插入引爆炸药的位置上,并与覆板表面接触,为防止雷管爆炸后前端的聚能作用对覆板的冲积产生凹坑,可在雷管下垫一小块橡胶或其他柔性物质。

8) 接起爆线,清理现场的物品,工作人员撤离到安全区,引爆焊接。

爆炸焊时,接触界面撞击点前方产生的金属射流,以及爆炸发生时覆板的变形和加速运动,必须沿整个焊接接头逐步地连续完成,这是获得爆炸焊牢固接头的基本条件。因此,炸药的引爆必须是逐步进行的,如果炸药同时爆炸,整个覆板与基板进行撞击,即使压力再高也不能产生良好的结合。

3. 焊接参数的选择

爆炸焊的焊接参数主要有炸药品种、单位面积药量、基板与覆板的安装间隙和安装角、基板与覆板的尺寸参数(主要有板材的厚度、基覆比)以及表面状态等。

(1) 炸药 炸药是爆炸焊的能源,其种类和密度决定爆炸速度,为了获得优质接头,要求爆速接近覆板金属的声速。爆速过高,会使撞击角度变小和作用力过大,容易撕裂结合部位;爆速过低,不能维持足够的爆炸角,也不能产生良好结合。

爆炸焊中使用的炸药有单一炸药和混合炸药,其中单一的高爆速炸药用作附加药包内的起爆药,混合的低爆速炸药用作主体炸药,炸药必须满足以下要求:

1) 爆速应当合适,一般以2000m/s左右为宜。对于大面积复合板材的焊接,覆板越厚,炸药的爆速应当越低。一般来讲,混合炸药能够满足这个要求。

2) 所用炸药应当具有稳定的物理、化学性质和爆炸性能,在厚度和密度较大的变化范围内能够用起爆器材引爆,并能迅速达到稳定爆轰,即不稳定爆轰区应当尽可能地小。

3) 炸药布放后与覆层紧密贴合,其间不应有间隙。

4) 炸药来源比较广、价格便宜、加工使用方便,加工运输储藏和使用过程中具有高的稳定性和安全性等。

5) 炸药的数量通常以覆板单位面积上布放的炸药数量或炸药厚度来计算,以 W_g (g/cm²)或 δ_0 (mm)表示。大面积复合板爆炸焊时,常用 W_g 来计算总药量,在大厚度复合板坯爆炸焊时,常用 δ_0 来计算总药量。药量的计算目前尚无理论公式,可采用经验公式(2-5-3)来计算:

$$W_g = BC \frac{(\rho\delta)^{0.6} R_e^{0.2}}{h_0^{0.5}} \quad (2-5-3)$$

式中 h_0 ——覆板与基板的安装间隙,单位为cm;

W_g ——覆板单位面积上布放的炸药量,单位为g/cm²;

ρ ——覆板的密度, 单位为 g/cm^3 ;

δ ——覆板的厚度, 单位为 cm ;

R_e ——覆板金属材料的屈服强度, 单位为 MPa ;

B 、 C ——计算系数, B 在 $0.05 \sim 3.0$ 之间选择, C 在 $0.5 \sim 2.5$ 之间选择。

(2) 安装间隙和安装角 爆炸焊的能量传递、吸收、转换和分配是通过间隙、借助覆板与基板的高速冲击碰撞来完成和实现的。安装间隙和安装角是影响爆炸角的主要因素之一, 在爆炸焊中, 如果爆炸角过小, 不论撞击速度有多大, 也不会产生射流现象, 反而容易引起结合面的严重熔化, 接头强度低。

平行法爆炸焊时采用均匀间隙值, 以 h_0 表示, 一般选覆板厚度的 $0.5 \sim 1.0$ 倍。角度法爆炸焊时, 间距小的一端以 h_1 表示, 间距大的一端以 h_2 表示, 由 h_1 和 h_2 之差, 以及金属板的长度计算出初始安装角 α 。经验和实践表明, 在大面积复合板的爆炸焊中常用平行法, 小面积复合板和一些特殊试验中可以用角度法进行爆炸焊。间隙的计算也无理论公式, 一般用经验公式 (2-5-4) 来计算。

$$h_0 = A(\rho\delta)^{0.6} \quad (2-5-4)$$

式中 h_0 ——覆板与基板之间的间隙距离, 单位为 cm ;

ρ ——覆板的密度, 单位为 g/cm^3 ;

δ ——覆板的厚度, 单位为 cm ;

A ——计算系数, 在 $0.1 \sim 1.0$ 范围内选择。

当 h_0 和 W_g 计算出来之后, 就准备相应尺寸的间隙柱和计算出炸药的总量, 然后进行一组小型复合板的试验。试验结果如有偏差, 可对原来计算的 h_0 和 W_g 值进行适当的调整, 利用得到的能满足技术要求的参数进行大面积复合板的爆炸焊。

(3) 基覆比 基板与覆板厚度之比称为基覆比。实践证明, 基覆比越大则越容易进行爆炸焊, 接头质量也越容易保证, 当基覆比接近 1 时爆炸焊很难进行, 一般要求该值应在 2 以上。

(4) 表面状态 表面状态与形成物理接触的面积有关, 对焊接质量有非常重要的影响, 焊前一定要进行表面清理以保持金属表面尽可能清洁和具有一定的粗糙度。试验结果表明, 表面质量越高, 焊接质量越好, 可焊范围越大。粗糙的表面既难于形成波形界面又易于熔化而形成金属间化合物的中间层, 因此应合理选择表面粗糙度。图 2-5-58 为钛-钢复合板的抗拉强度与表面粗糙度的关系, 从图中可知, 表面粗糙度超过 $Ra0.7\mu\text{m}$ 以后, 接头强度降低。

5.3.3 常用材料及典型工件的爆炸焊

1. 钛-钢复合板的爆炸焊

钛-钢复合板在石油化工和压力容器中得到越来越多的应用, 使用这种结构不仅可以成倍地降低设备成本, 而且能够克服单一的钛设备和衬钛结构在这个领域中应用的许多缺点。用钛-钢复合板制造的设备, 内层钛耐蚀性好, 外层钢具有高强度, 复合结构还具有良好的导热性, 以及克服热应力、耐热疲劳、耐压差等能力, 可以在更苛刻的条件下工作。因此, 钛-钢复合板已经成为现代化学工业中和压力容器工业中不可缺少的结构材料。

(1) 钛-钢复合板爆炸焊的工艺安装 大面积钛-钢复合板爆炸焊时, 其工艺安装多采用平行法, 起爆方式多采用中心起爆法, 少数情况下在长边中部起爆, 各类工艺安装示意图如图 2-5-59 所示, 图中的两个投影视图分别表示板的长度和宽度方向。其中, 图 2-5-59a 和 b 分别表示雷管的

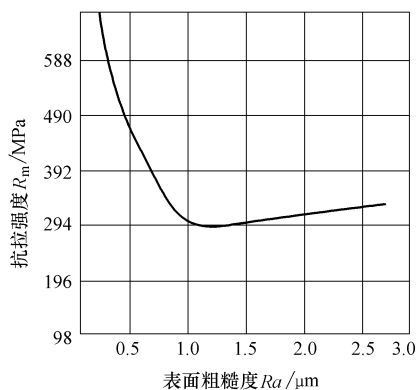


图 2-5-58 钛-钢复合板的抗拉强度与表面粗糙度的关系

安放位置不同,图 2-5-59c、d 和 e 分别表示有高速起爆混合炸药时的雷管安放位置。

(2) 钛-钢复合板爆炸焊焊接参数选择 大面积钛-钢复合板和大厚度钛-钢复合板坯的爆炸焊焊接参数见表 2-5-20 和表 2-5-21。从排气角度考虑,覆板越厚、面积越大,炸药的爆速应该越低,并且应采用中心起爆法。为了缩小和消除雷管区,在雷管下通常添加一定量的高爆速炸药,在爆炸焊接大面积复合板的情况下,为了间隙的支撑有保证,可在两板之间安放一定形状和数量的金属间隙物。在大厚度板坯的爆炸焊接情况下,间隙柱宜支撑在基板之外。为了提高效率和更好地保证焊接质量,可采用对称碰撞爆炸焊的工艺来制造这种复合板坯,如图 2-5-60 所示。

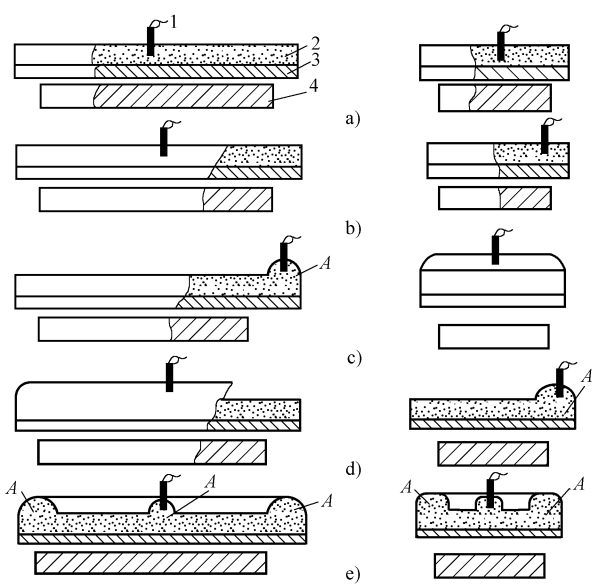


图 2-5-59 钛—钢复合板爆炸焊的工艺安装示意图

1—雷管 2—炸药 3—覆板 4—基板 A—高速起爆混合炸药

表 2-5-20 大面积钛-钢复合板爆炸焊的焊接参数

序号	钛 长/mm × 宽/mm × 厚/mm	钢 长/mm × 宽/mm × 厚/mm	炸药 品种	$W_g/(g/cm^2)$	h_0 /mm	保护层	起爆方式
1	TA1, 3 × 1100 × 2600	15MnV, 18 × 1100 × 2600	TNT	1.7	5 ~ 37	沥青 + 钢板	短边引出三角形
2	TA5, 2 × 1080 × 1760	902, 8 × 1060 × 1740	TNT	1.4	5, 1°	沥青 + 钢板	短边延长 300mm
3	TA5, 2 × 1080 × 2130	13SiMnV, 8 × 1100 × 2100	TNT	1.4	5, 1°	沥青 + 钢板	短边延长 300mm
4	TA1, 5 × 1800 × 1800	Q235, 25 × 1800 × 1800	TNT	1.5	3 ~ 20	沥青 3mm	短边中部起爆
5	TA2, 3 × 2000 × 2030	Q235, 20 × 2000 × 2030	TNT	1.5	3 ~ 25	沥青 3.6mm	短边中部起爆
6	TA1, 5 × 2050 × 2050	18MnMoNb, 35 × 2050 × 2050	2 [#]	2.8	20, 48'	沥青 3.5mm	短边中部起爆
7	TA1, ϕ 2800 × 5	14MnMoV, ϕ 2800 × 65	2 [#]	2.6	5, 40'	沥青 4mm	短边中部起爆
8	TA1, 5 × 2850 × 2850	14MnMoV, 75 × 2850 × 2850	2 [#]	2.5	5, 10'	沥青 4mm	短边中部起爆
9	TA1, 5 × 2000 × 2000	18MnMoNb, 35 × 2000 × 2000	2 [#]	2.6	10, 10'	沥青 3mm	短边中部起爆
10	TA1, 5 × 2850 × 2850	14MnMoV, 65 × 2850 × 2850	2 [#]	2.0 ~ 2.5	5 ~ 20	沥青 3mm	短边中部起爆
11	TA1, 5 × 2000 × 2000	18MnMoNb, 35 × 2000 × 2000	2 [#]	2.5 ~ 2.8	10 ~ 20	沥青 3mm	短边中部起爆
12	TA2, 3 × 1000 × 2000	Q235, 14 × 1000 × 2000	25 [#]	1.9	10	润滑脂	中心起爆
13	TA2, 1 × 1000 × 1500	Q235, 20 × 1500 × 2000	25 [#]	1.5	3	润滑脂	中心起爆
14	TA2, 2 × 1000 × 2000	Q235, 20 × 1000 × 2000	25 [#]	2.1	4	润滑脂	中心起爆
15	TA2, 3 × 1500 × 3000	20g, 25 × 1500 × 3000	25 [#]	2.2	6	水玻璃	中心起爆
16	TA2, 4 × 1500 × 3000	Q345, 30 × 1500 × 3000	25 [#]	2.4	8	水玻璃	中心起爆
17	TA2, 5 × 1500 × 3000	Q345R, 35 × 1500 × 3000	25 [#]	2.6	10	水玻璃	中心起爆
18	TA2, 6 × 1500 × 3000	Q345R, 50 × 1500 × 3000	25 [#]	2.8	12	水玻璃	中心起爆

表 2-5-21 大厚度钛-钢复合板坯的爆炸焊接参数

序号	钛 长/mm × 宽/mm × 厚/mm	钢 长/mm × 宽/mm × 厚/mm	炸药 品种	$h_2^{①}$ /mm	$h_1^{①}$ /mm	保护层	起爆方式
1	TA1, 10 × 700 × 1080	Q235, 75 × 670 × 1050	25 [#]	44	12	润滑脂	+ 辅助药包, 中心起爆
2	TA2, 10 × 690 × 1040	Q235, 70 × 650 × 1000	42 [#]	35	12	水玻璃	
3	TA2, 10 × 730 × 1130	Q235, 83 × 660 × 1050	42 [#]	40	12	润滑脂	
4	TA2, 12 × 690 × 1040	Q235, 70 × 650 × 1000	25 [#]	51	12	水玻璃	
5	TA2, 12 × 620 × 1085	Q235, 60 × 570 × 1050	25 [#]	55	13	润滑脂	
6	TA2, 8 × 1500 × 3000	Q345, 80 × 1500 × 3000	25 [#]	40	14	水玻璃	
7	TA2, 10 × 1500 × 3000	Q345R, 100 × 1500 × 3000	25 [#]	50	14	水玻璃	

① h_1 和 h_2 分别是角度法爆炸焊接时覆板和基板间的小间距及大间距。

(3) 钛-钢复合板结合区的组织 钛-钢爆炸复合板结合区的组织形态如图 2-5-61 所示。结合区通常呈现为波形组织，波形的形状因焊接参数不同有所差别。不同强度和特性的爆炸载荷、不同强度和特性的金属材料，以及它们的相互作用，将获得不同形状和参数（波长、振幅和频率）的结合区波形。

在一个波形内，界面两侧的金属发生了不同的组织变化，在钢侧，离界面越近，晶粒的拉伸式和纤维状塑性变形的程度越严重。并且在紧靠界面的地方出现细小的类似再结晶或破碎的亚晶粒的组织。在高倍放大的情况下，界面上还有一薄层沿波脊分布的熔化金属层，波前的漩涡区汇集了大部分爆炸焊过程中形成的金属熔体。这种熔体内还含有一般铸态金属中常有的一些缺陷如气孔、缩孔、裂纹、疏松和偏析等。从界面到钢基体，随着距离的增加，纤维状塑性变形的程度越来越小。当离开波形区以后，逐渐呈现出钢基体的原始组织形态。在高倍放大的情况下，还会发现波形内外有双晶组织。在钛板一侧，没有出现钢板一侧那种变形形状和变形规律，金属塑性变形，但出现了或多或少、长短疏密不同的特殊的塑性变形线和塑性变形组织。

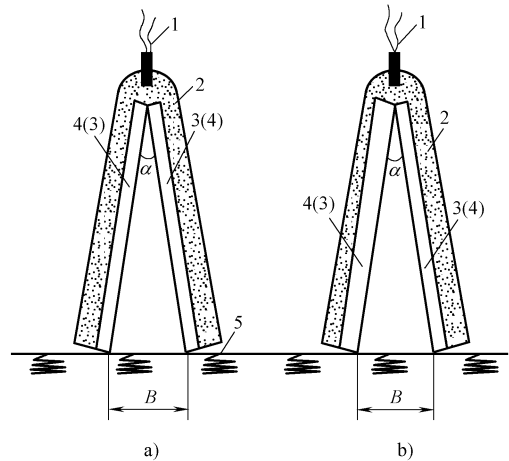


图 2-5-60 对称碰撞爆炸焊的工艺安装示意图
1—雷管 2—炸药 3—覆板 4—基板 5—地面（基础）
B—间距 α —两板夹角
a) 等厚度板焊接 b) 不等厚度板焊接

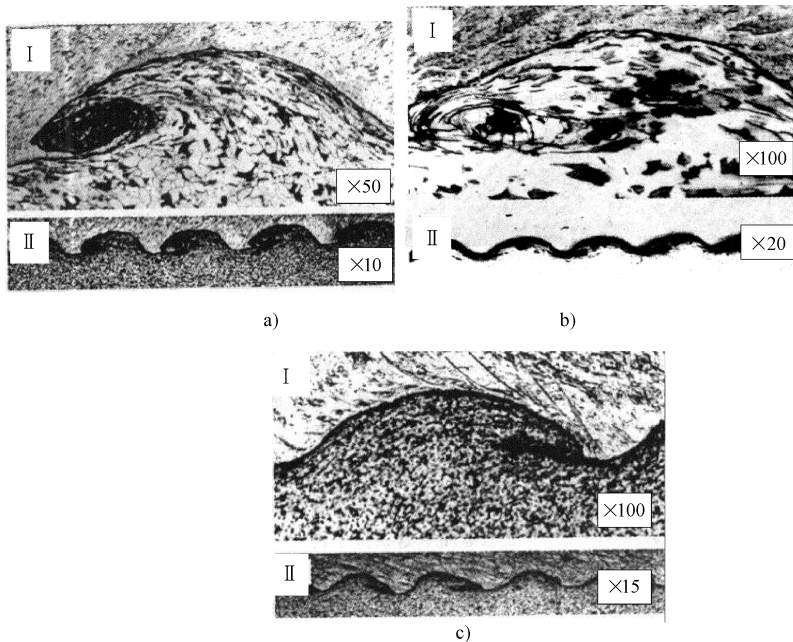


图 2-5-61 钛-钢爆炸复合板结合区的组织形态
a) 2#炸药 b) 铵盐炸药 c) TNT 炸药

(4) 钛-钢复合板的力学性能 钛-钢爆炸复合板的力学性能主要包括抗剪强度 τ_b 、抗拉强度 R_m 和弯曲性能等，见表 2-5-22 和表 2-5-23，其中 TA2 覆板母材（热轧态）的 R_m 为 490 ~ 539MPa，

A 为 20% ~ 25%，板材尺寸 8mm × 240mm × 340mm；Q235 钢基板（供货态）的 R_m 为 445 ~ 470MPa，A 为 22% ~ 24%，板材尺寸 26mm × 200mm × 300mm。

表 2-5-22 钛-钢复合板的力学性能

状态	复合板及尺寸/mm	τ_b /MPa	冷弯 $d = 2r, 180^\circ$		HV 覆层/粘结层/基层
			内弯	外弯	
爆炸态	TA2-Q235, (3 + 10) × 110 × 1100	397	良好	断裂	347/945/279
退火态	TA2-20G, (5 + 37) × 900 × 1800	191	良好	良好	215/986/160

表 2-5-23 钛-钢复合板的爆炸焊接参数及抗拉强度

组别	I					II			
试验序号	1	2	3	4	5	1	2	3	4
h_0 /mm	10	10	10	10	10	8	14	18	22
W_g /(g/cm ²)	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	3.5	3.5	3.5	3.5
W/g	3060	3570	4080	4590	5100	3570	3570	3570	3570
雷管区长度/mm	100	90	80	80	70	150	80	80	130
R_m /MPa	273	174	241	339	287	286	384	174	257

2. 锆合金-不锈钢管接头的爆炸焊接

锆合金（锆-2、锆-4、锆 2.5 铌等）是原子能工业不可缺少的结构材料，为了在核工程建设中节省这些稀缺和贵重的金属材料以及降低工程造价，可以在反应堆内使用锆合金管，而在堆外使用廉价的不锈钢管。爆炸焊很好地解决了这两种不同物理和化学性质的管材的焊接问题。

（1）复合管的爆炸焊工艺 锆合金与不锈钢复合管爆炸焊的工艺安装示意图如图 2-5-62 所示。采用内爆法爆炸焊，模具的实物照片如图 2-5-63 所示。

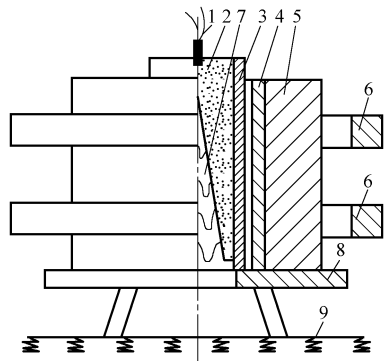


图 2-5-62 锆合金与不锈钢复合管爆炸焊的工艺安装示意图

1—雷管 2—炸药 3—覆管 4—基管 5—模具
6—固定环 7—木塞 8—底座 9—地面（基础）

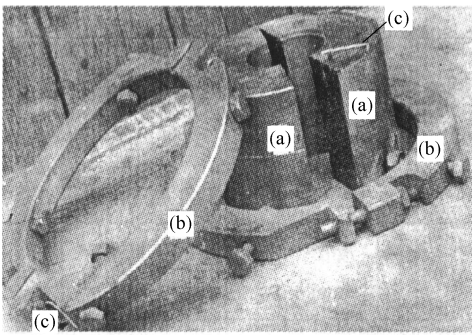


图 2-5-63 锆合金与不锈钢复合管爆炸焊模具的实物照片

（2）结合区组织和力学性能 锆合金与不锈钢复合管爆炸焊的结合区为有规律的波形结合，界面两侧的金属发生了拉伸式和纤维状的塑性变形，离界面越近这种变形越严重。波前的漩涡区汇集了爆炸焊接过程中形成的大部分熔化金属，少量残留在波脊上，厚度为微米级。复合管的产品如图 2-5-64 所示，接头力学性能见表 2-5-24。

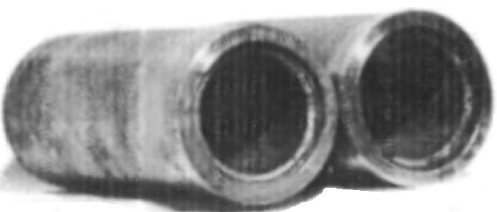


图 2-5-64 锆合金与不锈钢复合管爆炸焊的产品

表 2-5-24 铝合金与不锈钢复合管爆炸焊焊接参数及接头力学性能

序号	铝-2 覆管尺寸 /mm	12Cr19Ni9 基管尺寸/mm	$W_g/(g/cm^2)$		h_0 /mm	热处理或试 验状态		R_m /MPa	弯曲角/(°)	
			TNT	2 [#]		$T/^\circ C$	t/min		内弯	外弯
1	φ42.0×1.5×125	φ50.0×3.4×120	0.50	—	0.60	300	1440	372	—	—
2	φ42.0×1.5×125	φ50.0×3.4×120	0.50	—	0.60	400	1440	404	—	—
3	φ42.0×1.5×125	φ50.0×3.4×120	0.50	—	0.60	550	30	149	—	—
4	φ42.0×1.5×125	φ50.0×3.4×120	0.50	—	0.60	600	30	149	>100	>100
5	φ46.0×2.9×155	φ65.0×8.0×150	0.424	—	1.50	—	—	387	—	>100
6	φ46.0×2.9×155	φ65.0×8.0×150	—	0.565	1.50	—	—	418	—	>100
7	φ42.0×1.5×125	φ50.0×3.4×120	0.50	—	0.60	冷热循环 500 次		404	>100	>100
8	φ42.0×1.5×125	φ50.0×3.4×120	0.50	—	0.60	250℃瞬时拉剪		245	>100	>100

3. 其他材料的爆炸焊

除了钛-不锈钢、铝-不锈钢以外，爆炸焊还用于其他异种材料的连接，表 2-5-25 是常用材料爆炸焊接头的抗剪强度和弯曲性能。

表 2-5-25 常用材料爆炸焊接头的抗剪强度和弯曲性能

覆板材料	基板材料	抗剪强度/MPa	弯曲角/(°)	覆板材料	基板材料	抗剪强度/MPa	弯曲角/(°)
钛	铜	190~210	—	铝	不锈钢	70~90	—
镍	钛	330	>167	铜	2A01 铝合金	60~150	—
镍	不锈钢	430	180	银	钢、铜	100	—
铜	钢	190~210	—	铅	钢、铜	60	—
不锈钢	钢	290~310	180	钽	钢	—	180
铝	铜	70~100	—	钼	钢	—	180
铝	钢	70~120	—				

5.3.4 爆炸焊技术发展

爆炸焊集熔焊、扩散焊、压焊的优势于一体，使被连接金属实现完全的冶金结合，是一种独特、有前途的复合新技术，其技术发展及研究动态如下。

1) 爆炸复合理论尤其是冲击过程力学的研究，如爆炸载荷作用下覆板的运动规律；再入射流形成条件和过程；碰撞区压力场、速度场、应变率场及温度场的确定；爆炸复合波状界面形成机理等。

2) 爆炸复合理论中，在材料、冶金和力学性能的动态响应上进一步深入系统研究，如冲击波对材料冶金影响（晶体缺陷、冲击相变等）；材料在高温、高压、高应变率下的力学响应（如金属材料动态本构关系等）；材料在冲击载荷下的损伤和破坏；爆炸复合金属界面组织和力学行为；爆炸复合工艺参数的优化设计及数值模拟技术等。

3) 爆炸复合技术的新应用，如合成块体非晶态合金及制备非晶态涂层；实现金属和陶瓷的优质连接；制备高温、高强度金属基复合材料等。

5.3.5 爆炸焊的安全与防护

与其他焊接方法相比，爆炸焊是以炸药为能源进行焊接，爆炸过程中存在很多不安全因素，因此，爆炸焊工作中的安全问题就显得格外重要，必须制定严格的管理制度和实施规程。

1) 炸药库要严格管理，管理人员须昼夜值班，控制无关人员进入。炸药、雷管等物品需分类、分开存放，入库和出库要加以严格管理，做好相关的各项记录。炸药和原材料、雷管和工作人员均需分车运输。严禁炸药和雷管同车运输。

2) 爆炸场地应设置在远离建筑物的地方, 进行爆炸焊的场所周围不得有可能受到损害的物体。

3) 对从事爆炸焊工作的人员必须进行工种训练和考核, 只有通过考核并取得操作证才可以进行操作。同时要接受安全和保卫部门的监督, 遵守国家有关政策法规。爆炸焊操作过程应由专人进行统一调度和指挥, 应按事先计划好的工艺规程进行, 雷管和起爆器应固定专人管理。

4) 在进行爆炸焊操作之前应确保所有工作人员及物品均处于安全地带, 确保所有人员做好防声、防震措施。引爆前给出信号, 炸药爆炸 3min 后工作人员才能返回爆炸地点。若炸药未能爆炸, 也必须在 3min 后再进入现场进行检查和处理。工作人员不得将火种、火源带入工作现场。

一般来讲, 爆炸焊生产中通常使用低爆速的混合炸药 (如铵盐和铵油炸药), 其“惰性”较大, 仅用少量 TNT 等高爆速炸药作为引爆用, 而后者还需靠雷管来引爆, 所以只要严格控制好雷管和起爆器, 通常是不会出现严重的安全事故的。

5.4 变形焊

变形焊是在外加压力的作用下, 待焊金属产生塑性变形而实现固态连接的一种压焊方法。变形焊通常在室温或 100 ~ 350℃ 条件下的大气、惰性气体或超高真空中进行。

5.4.1 变形焊概述

1. 变形焊分类

变形焊大体分为三种类型, 室温下进行的变形焊称为冷压焊 (Cold Pressure Welding, CPW); 焊接温度在 300℃ 左右的变形焊称为热压焊 (Hot Pressure Welding, HPW), 该方法有工作台加热、压头加热、工作台与压头同时加热三种形式, 主要用于微型件的精密连接; 在超高真空中进行的变形焊则称为超高真空变形焊。

2. 变形焊的特点

- 1) 焊接时不需要添加焊丝、焊剂等焊接材料。
- 2) 由于焊接温度一般低于 350℃, 不需要高温加热装置, 焊接设备的制造成本低, 结构简单; 特别是冷压焊可以节约大量电能, 并节省由于焊接加热需要的辅助时间。
- 3) 不使用焊剂, 接头不需要焊后清洗, 不存在接头使用中因钎剂引起的腐蚀问题。
- 4) 焊接参数由模具尺寸决定, 不需要像电弧焊那样调节电流、电压、焊接速度等多个参数, 易于操作和实现自动化焊接。
- 5) 接头温升不高而不出现熔化状态, 不产生类似电弧焊接头的软化区、热影响区, 也不生成脆性金属间化合物; 特别是冷压焊时焊接过程中不产生热量, 材料结晶状态保持不变。
- 6) 凡具有一定延性的金属 (Al、Ag、Cu、Cd、Fe、Pb、Sn、Ti、Zn 等) 及其合金都可以进行焊接, 特别适合于异种金属 (包括有限互溶, 液相、固相不相溶的非共格金属间的组合) 和焊接中怕升温材料的焊接。

3. 变形焊接头形式

变形焊接头主要采用搭接和对接两种接头形式, 如图 2-5-65 和图 2-5-66 所示。

搭接变形焊主要用于箔材、板材的连接。搭接焊时, 将工件搭放好后, 用压头加压, 当压头压入必要的深度后, 去除压力完成焊接。用柱状压头形成焊点, 称为变形搭接点焊; 用滚轮式压头形成焊缝, 称为变形搭接缝焊。搭接缝焊又分为滚压焊、套压焊和挤压焊三种形式。

对接变形焊主要用于同种或异种金属线材、棒材或管材的连接。对接变形焊将工件分别夹紧在

左右钳口中，并伸出一定长度，施加足够的顶锻压力，使伸出部分产生径向塑性变形，将被焊界面杂质挤出，形成金属飞边，紧密接触的纯洁金属形成焊缝，完成焊接过程。

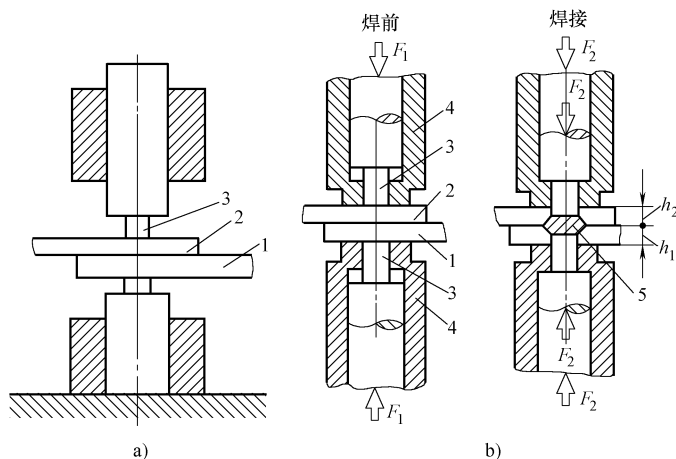


图 2-5-65 搭接变形焊接头形式示意图

a) 带轴肩式 b) 带预压套环式

1、2—工件 3—压头 4—预压套环 5—接头 h_1 、 h_2 —工件厚度 F_1 —预压力 F_2 —焊接压力

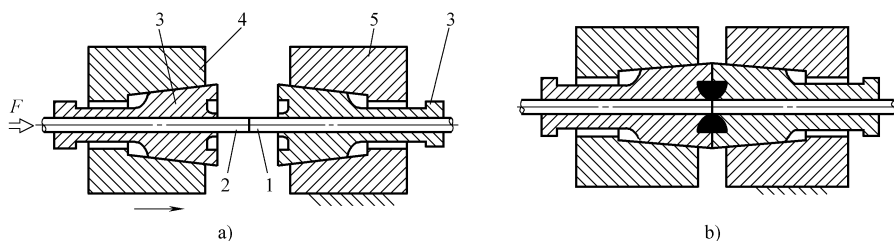


图 2-5-66 对接变形焊接头形式示意图

a) 顶锻前 b) 顶锻后 (飞边切掉)

1、2—工件 3—钳口 4—活动夹具 5—固定夹具

搭接是热压焊接头的主要形式，按照焊接压头的形状可以分为楔形压头、空心压头、带槽压头以及带凸缘压头的热压焊，如图 2-5-67 所示。其中，图 2-5-67a、c、d 三种压头都是将金属引线直接搭接在基板导体或芯片的平面上；而图 2-5-67b 则是一种金丝球焊法，即金属丝导线从空心爪头的直孔中送出或拉出引线，在引线端用切割火焰将端头熔化，借助液态金属的表面张力，在引线端头形成球状，压焊时利用压头的周壁对球施加压力，形成圆环状焊缝，该方法在半导体器件的引线连接中得到广泛应用。

4. 变形焊机理及接头组织形态

变形焊的机理比较简单，主要是待焊试件在所加压力的作用下，通过材料的物理接触，使待焊试件产生大的变形，在变形时表面的氧化膜破裂并通过材料的塑性变形被挤出连接界面，使纯金属相互接触，并发生键合而形成牢固的连接接头。

冷压焊在焊接过程中，由于接头变形严重，结合界面呈现出复杂的峰谷和犬牙交错的空间面貌，其结合面面积比简单的几何断面大。在正常情况下，同种金属材料的冷压焊接头强度不低于母材，其原因是由于冷压焊过程中的形变硬化而使接头强化；异种金属材料的冷压焊接头强度不低于较软金属的强度。同时，由于结合界面大，又无中间相生成，所以接头的导电性、耐蚀性优良。

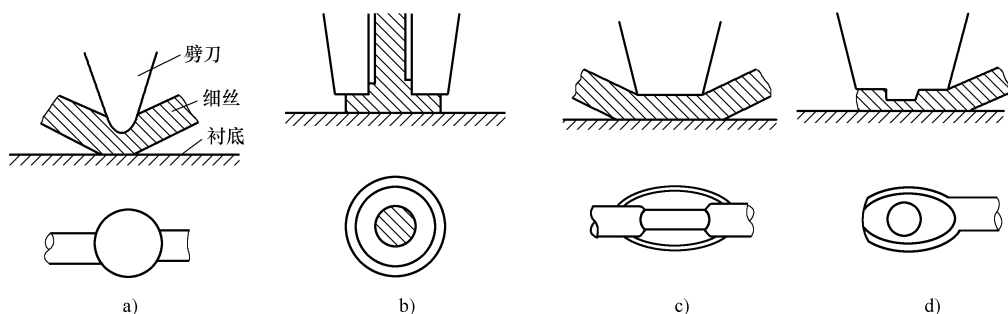


图 2-5-67 热压焊接头形式及焊点形状

a) 楔形压头 (扁平焊点) b) 空心压头 (金丝球焊点) c) 带槽形的压头 d) 带凸缘的压头

5.4.2 变形焊工艺

1. 工艺特点

1) 变形焊工艺的最大特点是焊接时产生变形, 变形量是实现两界面键合的重要条件。通过变形不仅使氧化膜破碎, 还可以克服界面上的微观不平度, 使两个界面间的金属原子紧密接触。

2) 大气及室温焊接所需的最小变形量根据外界条件的不同而不同, 在大气和室温下的变形焊, 其最小变形量均在 60% 以上。

变形焊所需的最小变形量还与待焊接材料的性质以及表面氧化膜的性质有关。例如, 在室温和大气条件下, 不同金属的焊接性差别很大, 表面生成脆而硬的氧化膜所需的变形量小, 而生成软 (活韧性好) 氧化膜时所需的变形量大, 前者如铝合金焊接, 后者如铜合金焊接。

大气和室温冷压焊时, 如果待焊表面存在油污, 则多大的变形量也不能实现连接。

3) 利用纯氩气氛保护, 并在室温焊接条件下进行焊接时, 所需的最小变形量可在 20% 以下。在超高真空条件下进行变形焊接, 其最小变形量可在 5% 以下。

在惰性气体或超高真空条件下, 如果表面进行了清理, 各种金属变形焊的焊接性没有太大的差别, 主要是氧化膜的影响因素已经排除。

4) 表面粗糙度对变形量有影响, 在真空精密焊接条件下, 待焊界面的表面粗糙度越小, 所需的最小变形量也越小。

5) 焊接温度对变形量也有影响, 和扩散连接一样, 提高焊接温度, 可以减小变形量, 从而减小焊接压力和变形。

6) 超高真空变形焊可以消除氧化膜的影响, 各种金属的焊接性差异很小, 其变形量只有大气中变形焊的 6%, 属精密焊接, 压痕最小, 耗能也少。

2. 冷压焊工艺

(1) 材料的焊接性 冷压焊主要适用于硬度不高、延性好的金属薄板、线材、棒材和管材的连接。特别适宜于焊接中不允许接头升温的产品。在模具强度允许的前提下, 很多不会产生快速加工硬化或未经严重硬化的延性金属如 Cu、Al、Ag、Au、Ni、Zn、Cd、Ti、Sn、Pb 及其合金均适合冷压焊; 它们之间的任意组合, 包括液相、固相不相溶的非共格金属如 Al 与 Pb、Zn 与 Pb 等的组合, 也可进行冷压焊。表 2-5-26 给出了各种金属组合采用冷压焊的焊接性。但是对于某些异种金属 (如 Cu 与 Al), 在高温下会因扩散作用而产生脆性化合物, 使其延性明显下降, 这类材料的组合只宜在较低温度下进行冷压焊, 工作环境温度也不应太高。

(2) 表面状态 冷压焊工艺要求焊接件接触界面要有良好的表面状态, 主要包括选择合适的表面粗糙度和表面清洁度。

表 2-5-26 各种金属冷压焊的焊接性

材料	Ti	Cd	Pt	Sn	Pb	W	Zn	Fe	Ni	Au	Ag	Cu	Al
Ti	+	+						+				+	+
Cd		+	+	+	+								
Pt			+	+	+		+		+	+	+	+	+
Sn		+	+	+	+								
Pb		+	+	+	+		+		+	+	+	+	+
W												+	
Zn			+		+			+	+	+	+	+	+
Fe	+						+	+	+			+	+
Ni			+		+		+	+	+	+	+	+	+
Au			+		+		+		+	+	+	+	+
Ag			+		+		+		+	+	+	+	+
Cu	+		+		+	+	+	+	+	+	+	+	+
Al	+		+		+		+	+	+	+	+	+	+

注：+为焊接性良好（++为同种金属焊接）；空白为焊接性差或无相关报道。

1) 表面粗糙度：一般来说，冷压焊对工件待焊表面的表面粗糙度没有很高的要求，经过轧制、剪切或车削的表面都可以进行冷压焊。带有微小沟槽不平的待焊表面，在挤压过程中有利于界面的切向位移，对焊接过程有利。但是，当焊接塑性变形量小于20%和进行精密真空压焊时，就要求待焊表面有较低的表面粗糙度，特别是精密真空变形焊时，界面的表面粗糙度越小，所需的最小变形量越小，此时的待焊表面和扩散连接时的表面加工要求相同。

2) 待焊表面的清洁度：待焊表面的油脂、污染物、水膜及其他有机杂质是影响冷压焊质量的主要因素之一。在冷压焊过程中，这些杂质将被压延成微小的薄膜，不论焊接件产生多大的塑性变形量，都无法将其彻底挤出结合面，因此必须在焊前采用化学溶剂清洗或超声波净化的方法去除。

焊件表面的金属氧化膜对冷压焊质量也有影响，厚度不大的脆性的氧化膜（如铝工件表面的 Al_2O_3 ）在塑性变形量大于65%的条件下可以不进行清理，其余材料在冷压焊前都应进行氧化膜清理。钢丝刷或钢丝轮清理是最常用的清理方法，钢丝轮（丝径为0.2~0.3mm，材质最好是不锈钢）的旋转线速度以1000m/min为宜，然后再进行化学溶剂或超声波清洗。为保证获得质量稳定的冷压焊接头，清理后的焊件表面不允许遗留残渣或氧化膜粉屑。例如用钢丝轮清理时，通常要附加负压吸收装置，以去除氧化膜尘屑。清理后的表面应予以保护，避免装配时造成待焊表面的再污染。工件一经清理，应尽快施焊。

(3) 塑性变形量 冷压焊时所需的最小塑性变形量是控制焊接质量的关键参数，也是判断材料冷压焊焊接性好坏的一个指标。材料的塑性变形量越小，冷压焊焊接性就越好。不同金属材料具有不同的最小塑性变形量，纯铝的变形程度最小，其冷压焊焊接性最好，其次是钛，也具有好的冷压焊焊接性。

实现冷压焊的条件之一是焊接件的实际塑性变形量要大于该金属的标称“变形程度”值，但不宜过大。过大的变形量会增加冷作硬化现象，使韧性下降。例如对铝及多数铝合金搭接时压缩率多控制在65%~70%范围内。

搭接冷压焊的塑性变形程度用压缩率 ε 表示，是指被压缩厚度占焊件总厚度的百分比，可用下式表示：

$$\varepsilon = \frac{(h_1 + h_2) - h}{h_1 + h_2} \times 100\% \quad (2-5-5)$$

式中 h_1 、 h_2 ——分别为工件的厚度；

h ——压缩后的剩余厚度。

表2-5-27给出了各种金属材料的最小压缩率，这些材料的压缩率是在相同厚度、相同冷压点

焊条件下得到的。在冷压焊生产中，为了保证得到满意的焊合率，并考虑到各种误差的存在，实际选用的压缩率应比表 2-5-27 中的数据大 5% ~ 15%。

表 2-5-27 各种金属材料搭接点焊的最小压缩率

材料名称	压缩率(%)	材料名称	压缩率(%)	材料名称	压缩率(%)
纯铝	60	铜与铝	84	镍	89
工业纯铝	63	铜与铅	85	铁	92
钛	75	铜与银	85	锌	92
硬铝	80	铜	86	银	94
铅	84	铝与钛	88	铁与镍	94
镉	84	锡	88	锌合金	95

对接冷压焊的塑性变形程度用总压缩量 L 表示，它等于工件每次压缩长度与顶锻次数的乘积，可用式 (2-5-6) 表示：

$$L = n(L_1 + L_2) \tag{2-5-6}$$

式中 L_1 ——固定钳口一侧工件每次压缩的长度；
 L_2 ——活动钳口一侧工件每次压缩的长度；
 n ——挤压次数。

对接冷压焊时，获得合格接头的关键因素是要有足够的总压缩量，表 2-5-28 给出了对接冷压焊时的最小总压缩量，有些材料需要靠多次压缩才能实现可靠连接。对于延性好、变形硬化不强烈的金属，工件的压缩量通常小于或等于其直径或厚度，焊接时使构件的伸出长度等于压缩长度，可一次顶锻焊成。对于硬度较大、形变强化较强的金属，压缩量通常大于或等于工件的直径或厚度，需要多次顶锻才能焊成，对于大多数材料，顶锻次数一般不大于 3 次。

表 2-5-28 对接冷压焊所需的最小总压缩量

材料名称	每一工件的最小总压缩量		顶锻次数
	圆形件(直径 d)	矩形件(厚度 h_1)	
铝与铝	$(1.6 \sim 2.0)d$	$(1.6 \sim 2.0)h_1$	2
铝与铜	铝 $(2 \sim 3)d$	铝 $(2 \sim 3)h_1$	3
	铜 $(3 \sim 4)d$	铜 $(2 \sim 3)h_1$	
铜与铜	$(3 \sim 4)d$	$(3 \sim 4)h_1$	3
铝与银	铝 $(2 \sim 3)d$	铝 $(2 \sim 3)h_1$	3 ~ 4
	银 $(3 \sim 4)d$	银 $(3 \sim 4)h_1$	
铜与镍	铜 $(3 \sim 4)d$	铜 $(3 \sim 4)h_1$	3 ~ 4
	镍 $(3 \sim 4)d$	镍 $(3 \sim 4)h_1$	

生产实际中，为了提高效率，希望减少顶锻次数，这就要求构件的伸出长度尽可能大。但伸出长度过大，顶锻时会使工件发生弯曲。同种材料对接冷压焊时，直径越小被顶弯的倾向性越大，伸出长度通常取直径或厚度的 0.8 ~ 1.3 倍，断面小的工件取下限值。异种材料对接冷压焊时，伸出长度与材料的弹性模量有关，根据两弹性模量的比值选取，较软工件的伸出长度也较短。

(4) 焊接压力 冷压焊的能量是靠压力而获得的，搭接冷压焊时压力通过压头传递到待焊部位，而对接冷压焊时，压力通过夹头夹紧传递到待焊构件的界面上。焊接总压力与被焊接材料的横断面面积有关，横断面面积在对接冷压焊时是指工件的断面面积，而在搭接冷压焊时是指压头的端面积。

在冷压焊过程中，由于金属发生塑性变形产生硬化和模具对金属的拘束力，会使单位焊接压力增大。冷压焊的单位焊接压力通常要比被焊接材料的屈服强度大许多倍。对接冷压焊时，构件随变形的进行而被墩粗，使工件的名义断面面积不断增大。因此，焊接末期所需的压力比焊接初始时的压力要大。几种金属单位面积所需的焊接压力见表 2-5-29。

表 2-5-29 几种金属冷压焊所需的焊接压力 (单位: MPa)

材料名称	搭接焊	对接焊	材料名称	搭接焊	对接焊
铝与铝	750 ~ 1000	1800 ~ 2000	铜与镍	2000 ~ 2500	2500
铝与铜	1500 ~ 2000	> 2000	HLJ 型铝合金	1500 ~ 2000	> 2000
铜与铜	2000 ~ 2500	2500			

冷滚压焊时, 压轮直径对焊接压力的影响如图2-5-68所示 (图中材料的屈服强度为 50MPa, 形变率为 70%, 摩擦因数为 0.25), 由图可以看出随着压轮直径 D 的增大, 所需的焊接压力急剧增大。从减小焊接压力的角度来考虑, 压轮直径越小越好, 同时压轮直径还是决定工件能否自然入机、使滚焊得以顺利进行的重要因素。工件能够自然入机的条件是 $D \geq 175 \Delta h$ (Δh 为两焊件的厚度差)。因此, 选用压轮直径时, 在满足该条件下应尽可能选用小直径的压轮。

(5) 压轮直径 冷滚压焊时需要选择合理的压轮直径, 压轮直径选择不但要考虑设备能够提供的最大输出焊接压力, 还要考虑工件总厚度。当焊机功率确定之后, 焊接件总厚度越小, 选用的压轮直径可相应减小。焊接件总厚度、压轮直径与焊接压力的关系如图 2-5-69 所示, 图中材料的屈服强度为 50MPa, 形变率为 70%, 摩擦因数为 0.25。

冷滚压焊的生产率较高, 例如滚压焊接铝管, 焊接速度可以达到 28cm/s 以上, 而且在短时间停机的条件下, 可以任意调节焊接速度, 而焊接质量不受影响, 这是其他焊接方法无法实现的。

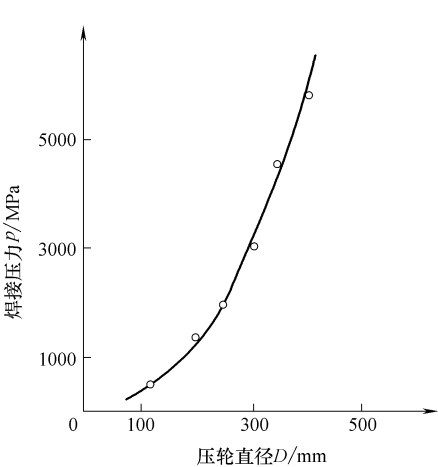


图 2-5-68 压轮直径对焊接压力的影响

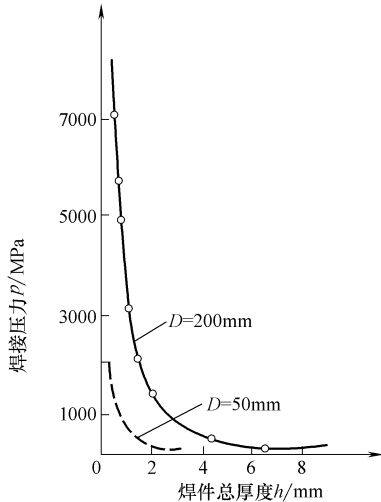


图 2-5-69 焊件总厚度、压轮直径与焊接压力的关系

3. 热压焊工艺

热压焊在半导体器件的引线连接中得到了广泛的应用, 其焊接本质与冷压焊完全相同, 是在加热的条件下施加压力, 使待焊金属界面产生足够的塑性变形, 达到金属原子间的结合而形成优良的焊缝。焊接时的加热是为了减小变形程度和焊接压力, 实现小压力和小变形程度下的固态焊接。热压焊根据压头形式, 可以分为金丝卧式搭接和金丝球式。卧式搭接时压头又有剪刀式和鸟嘴式两种形式, 剪刀式压头具有焊后剪切引线的剪刀装置, 而鸟嘴式压头则使用剪刀式压头的后刀压断已焊完的引线 (未完全切断, 移动压头时将引线拉断)。

热压焊的焊接参数包括焊接温度、压力和时间等。这些参数的确定要依据被焊接材料的性质、加热方式和引线尺寸等。下面以微电子连接为例介绍两种典型的热压焊工艺的焊接参数。

(1) 卧式搭接热压焊 (鸟嘴式、剪刀式) 卧式搭接热压焊焊接温度、焊接压力和焊接时间

三者互相影响，加热温度较高时，压力可减小，加压时间也可以相应缩短；压力还与搭接面积有关，当搭接面积增大时，相应的焊接压力增大；采用的引线材料不同，压力也不同，当用铝丝做引线时，所施加的焊接压力比金丝引线要小。

(2) 金丝球式热压焊 金丝球式热压焊主要应用于硅半导体芯片引线的连接，例如，当硅半导体芯片表面蒸镀 1350nm 的铝金属层时，采用直径为 25.4μm 的金丝引线，压头材料为玻璃管，焊接参数见表 2-5-30。从表中可知，与卧式搭接热压焊相比，金丝球式热压焊的焊点面积要小得多，电极压力和焊点拉力都比较小。从微型化角度出发，金丝球式热压焊的接头比较紧凑，占据的面积较小，适用于高密度集成电路或体积小的半导体芯片的连接。

表 2-5-30 典型热压焊焊接参数

压头形式	压头材料	焊接温度/℃	压力/N	时间/s	接头拉力/N
卧式搭接	碳化钨	310	0.5	6	60.3×10^{-3}
金丝球式	玻璃管	310	0.12	6	4.8×10^{-3}

4. 超高真空变形焊工艺

超高真空变形焊不存在氧化膜的再生问题，所需的变形量是为了使两界面上金属原子接近到形成接触键合的程度。带有氧化膜的构件在真空中施焊时氧化膜很难通过挥发而自行消失，必须在焊前进行清理。清理的方法可以采用机械方法，但最好的方法是用（考夫曼枪）离子束清理。超高真空变形焊示意图如图 2-5-70 所示，通常在真空室中装有粒子束枪，焊接时先用粒子束清洗待焊表面，该过程不但能去除氧化膜和吸附的其他杂质及气体，还能把界面上的凸出点削平，其可达性非常好，特别适于在生产流水线中应用。

(1) 清理方法 在真空条件下进行变形焊时，可以先采用机械清理方法，在充高纯度 Ar 气的真空室内进行。工件放入真空室后抽到 10^{-7} Pa 的真空度，再用氩离子束溅射清理被焊界面，离子束电压为 1100 ~ 1400V，离子束流为 20 ~ 30mA，束径约 10nm。

(2) 真空度的确定 清理过的被焊界面经过一段时间仍然会在界面上吸附一层气体，这层气体仍然是金属键合的障碍。不同真空度条件下吸附一层气体所需的时间由式（2-5-7）确定：

$$t = \frac{\sqrt{MT}}{2.3 \times 10^{20} D^2 p}$$

(2-5-7)

式中 t ——布满一个分子层所需时间，单位为 s；

M ——气体相对分子质量；

T ——热力学温度，单位为 K；

D ——分子直径，单位为 cm；

p ——真空室压力，单位为 Pa。

对于氧气而言，在室温条件下，当 $p = 10^{-4}$ Pa 时，布满一个分子厚的氧化膜层所需时间 $t = 31$ s；而当 $p = 10^{-6}$ Pa 时， $t = 310$ s。因此，当真空室内的压力低于 10^{-5} Pa 时，清理后即刻施焊就能够满足焊接要求。

(3) 变形量的确定 超高真空冷压焊所需的变形量比较小。该变形量与界面的表面粗糙度和材料的弹性变形量有关系。界面的表面粗糙度越小，变形量越小，反之选取大的变形量；被焊接材料的弹性变形量大时，除了在挤压变形时克服不平度外，还要加上该材料挤压时的弹性变形量，这需要用试验方法予以确定。变形量还与焊接的真空度有关，当 $p = 10^{-5}$ Pa 时，变形量只需要大气变

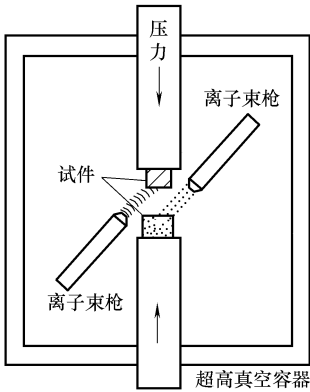


图 2-5-70 超高真空变形焊示意图

形焊的 $1/3$ ，当待焊表面采用氩离子束溅射清理和 $p = 10^{-7} \text{ Pa}$ 时，变形量为大气中压焊的 $1/12$ 。

超高真空冷压焊所消耗的能量是所有焊接方法中最少的，其所用的模具与冷压焊所用的模具相同，特别适于太空焊的要求。

5.4.3 典型材料及构件的焊接

1. 典型结构的冷压焊

如图 2-5-71 所示，冷压焊在各个领域具有很多应用，在电子行业，用于制造圆形、方形电容器外壳的封装、绝缘箱外壳的封装、大功率二极管散热片、电解电容阳极板与屏蔽引出线等。在电气工程中用于通信、电力电缆的铝导管、护套管的连续生产，各种规格铝、铜过渡接头，电线厂、电缆厂、电机厂、变压器厂和开关厂铝线及铝合金导线的接长及引出线，铜排、铝排、整流片、汇流圈的安装，输电站引出线，架空电线、通信电线、地下电缆的接线和引出线，电缆屏蔽带接地，铜式铝箔绕组引出线，石英振子盒封装、集成块封装、铌钛合金超导线的连接等。此外，还用于制冷工程的热交换器、汽车行业的散热器和散热器片，以及其他行业的铝管、铜管、铝锰合金管、钛管的对接、封头等。

由于受到焊机吨位的限制，冷压焊件的搭接厚度或对接焊断面面积不能过大，焊接件的硬度受冷压焊模具材料的限制也不能过高。搭接冷压焊可以焊接厚度为 $0.01 \sim 20 \text{ mm}$ 的箔材、带材和板材以及管材的封端及棒材的搭接等。对接冷压焊接头的最小断面积为 0.5 mm^2 ，最大焊接端面积可达 500 mm^2 。

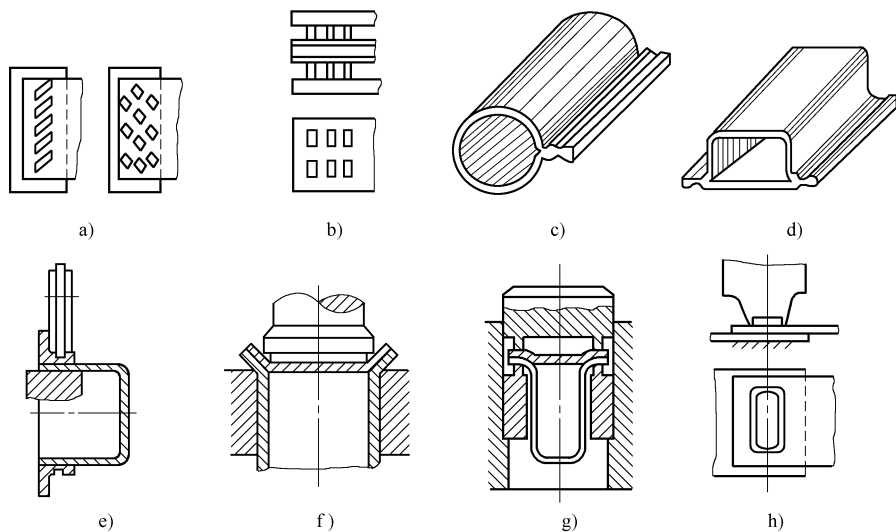


图 2-5-71 冷压焊的应用实例

- a) 铝箔多点焊 b) 铝板双面镶焊铜板 c) 滚焊制管 d) 矩形容器滚焊
e) 筒体与法兰单面滚压焊 f) 容器封头挤压焊 g) 碟形封头双面套压焊 h) 单面套压焊

2. 金丝球热压焊

金丝球热压焊主要应用于电子微型焊接领域，如芯片引线的焊接（搭接热压焊）。焊接主要过程是首先将极薄的硅芯片表面用蒸镀法在待焊处镀一层纳米级厚的铝金属膜，用纳米级直径的金丝引线（引线材料有时也可以用铝丝代替）将硅芯片上的铝膜与基板上的导体相连接，或者几个硅芯片铝膜间互连。金丝球热压焊的压头由硬玻璃制成，内设金属引线丝孔，构造颇似熔化极气体保护焊的导电嘴。靠端头平整的环状端面对球施加压力，焊点外形虽然为圆形，但真正焊接部分仅是

加压的环状部分。

图 2-5-72 是鸟嘴式压头热压焊过程示意图，其中，图 2-5-72a 表示硅芯片引线焊点 1 已焊好，松开的鸟嘴式压头拉出引线已经移到基片导体上进行压焊；图 2-5-72b 表示第 2 焊点焊完后，抬起压头；图 2-5-72c 是压头向右平移，此时鸟嘴夹紧金丝，使引线受力；图 2-5-72d 是压头向右平移过程中，拉断焊点右侧的金丝引线，准备移动至下一个待焊点。

图 2-5-73 是金丝球压焊过程示意图，其中，图 2-5-73a 表示焊完第 1 点后，抬起压头，用火焰烧断金丝，形成球形端头；图 2-5-73b 是压头平移至下一个待焊部位；图 2-5-73c 表示压头下送，顶紧被焊部位，加压并进行焊接；图 2-5-73d 表示抬起压头，拉长金丝引线，准备进入火焰烧断金丝阶段，以便进行另一焊点的焊接。

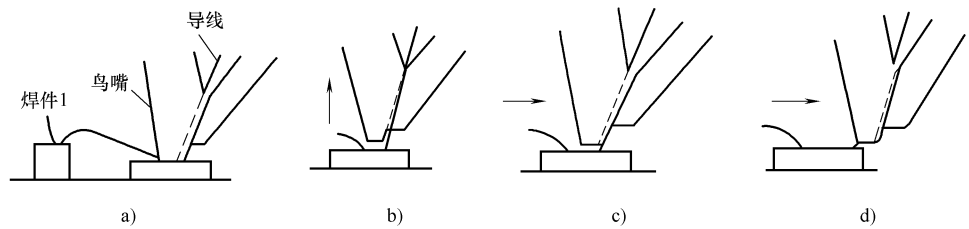


图 2-5-72 鸟嘴式压头热压焊过程示意图

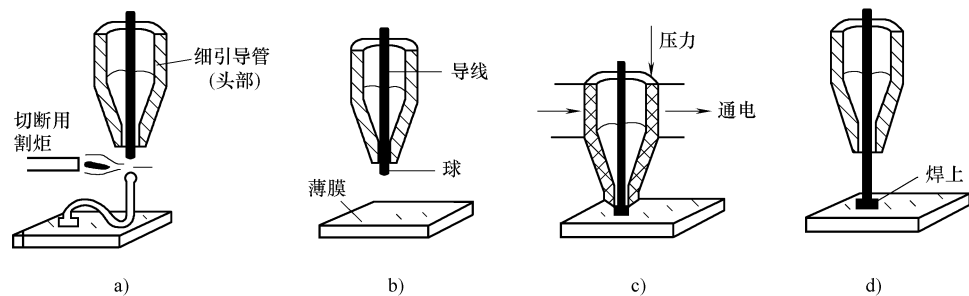


图 2-5-73 金丝球压焊过程示意图

5.4.4 变形焊设备

1. 冷压焊设备

(1) 焊机 冷压焊的主要设备是能够提供足够压力的焊机，除了专用的冷滚压焊设备外（其压力由压轮主轴承承担，不需要另外提供压力），其余的冷压焊设备都可以利用常规的压力机改装而成。表 2-5-31 列出了部分冷压焊机的相关技术参数。但是，冷压焊时，需要适合各类焊接接头形式的模具，如冷压点焊压头、滚焊压轮、套压焊模具、挤压焊模具和对压焊钳口等。

表 2-5-31 部分冷压焊机的相关技术参数

冷压焊设备	压力/kN	可焊断面面积/mm ²			参考质量/kg	设备参考尺寸/mm
		铝	铝与铜	铜		
携带式手焊钳	(10) ^①	0.5~20	0.5~10	0.5~10	1.4~2.5	全长 310
台式对焊手钳	(10~30)	0.5~30	0.5~20	0.5~20	4.6~8	全长 320
小车式对焊手钳	(10~50)	3~35	3~20	3~20	170	1500×7500×750
气动对接焊机	50	2.0~200	2.0~20	2.0~20	62	500×300×300
	8	0.5~7	0.5~4	0.5~4	35	400×300×300

(续)

冷压焊设备	压力/kN	可焊断面面积/mm ²			参考质量 /kg	设备参考尺寸 /mm
		铝	铝与铜	铜		
油压对接焊机	200	20~200	20~120	20~120	700	1000×900×1400
	400	20~400	20~250	20~250	1500	1500×1000×1200
	800	50~800	50~600	50~600	2700	1500×1300×1700
	1200	100~1500	100~1000	100~1000	2700	1650×1350×1700
携带式搭接手焊钳	(8)	厚度1mm以下			1.0~2	全长200×350
气动搭接焊机	500	厚度3.5mm以下			250	680×400×1400
油压搭接焊机	400	厚度3mm以下			200	1500×800×1000

① 括号内的压力值为计算值。

(2) 搭接点焊压头 搭接点焊压头的形式较多，可分为圆形（实心或空心）、矩形、菱形或环形等（图 2-5-73）。按压头数目可以分为单点点焊和多点点焊，单点点焊又可以分为双面点焊和单面点焊。

压头尺寸根据工件厚度确定，圆形压头直径和矩形压头的宽度应合理选取，压头尺寸过大时，变形阻力增大，焊点四周金属变形大，在焊点中心容易产生焊接裂纹。压头过小时，将因局部切应力过大而切割母材。一般来讲，相同厚度的构件冷压焊时，压头直径 $d = (1.0 \sim 1.5) h_1$ ；不等厚度的构件点焊时，压头尺寸按薄件厚度 h_1 确定，选取 $d = 2h_1$ 。

冷压点焊时，压缩率由压头压入深度来控制，通常的办法是设计带轴肩的压头（图 2-5-74a），从压头端部至轴肩的长度即压入深度，以此控制准确的压缩率，同时还起到防止工件翘起的作用。另一种方式是在轴肩外围加设套环装置（图 2-5-74b），套环采用弹簧或橡胶圈对工件施加预压力，其预压力应控制在 20~40MPa 的范围内。

为了防止压头的边缘切割被焊金属，压头工作面的周缘应加工成 $R = 0.5\text{mm}$ 的圆形倒角。

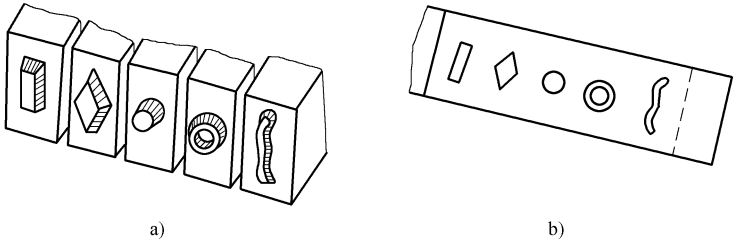


图 2-5-74 搭接点焊压头形式及焊点形状
a) 压头 b) 焊点

(3) 对接冷压焊焊钳 在对接冷压焊过程中，冷压焊的焊钳主要是传递焊接压力，控制焊件塑性变形的大小和切掉飞边，因此需要施加较大的夹紧力和顶锻力，要求焊钳材料必须用模具钢制造，并且有较高的制造精度。冷压焊钳分固定和可移动两部分，各部分由相互对称的半模组成，焊接时各部分夹持一个焊件。

冷压焊钳可以分为槽形钳口、尖形钳口、平形钳口和复合型钳口 4 种类型。由于尖形钳口具有有利于金属的流动、能挤掉飞边、所需的焊接压力小等特点，在实际中应用得较多。为了克服尖形钳口在焊接过程中容易崩刃的缺点，在刃口外设置了护刃环和溢流槽（容纳飞边），如图 2-5-75 所示。为了避免顶锻过程中焊接件在钳口中打滑，应对钳口内腔表面进行喷丸处理或加工深度不大的螺纹型沟槽，增加钳口内腔与焊接件之间的摩擦因数。钳口内腔的形状根据被焊件的断面形状设计，可以是简单断面，也可以是复杂断面。冷压焊钳口的关键部位是刃口，刃口厚度通常为 2mm

左右,楔角为 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$,磨削加工制成。钳口材料的硬度应控制在 $45 \sim 55\text{HRC}$,硬度太大,韧性差,易崩刃;硬度太小,刃口会变成喇叭状,使冷压焊接头粗糙。

2. 热压焊设备

热压焊主要应用于微电子领域引线的焊接,属于微型精密焊接,要求焊接设备的自动化程度要高,如采用微型计算机控制和高精度焊接机械手等。

热压焊的焊接机械手必须能够实现 X 、 Y 和 Z 三个方向的精确定位,以硅芯片引线与基片导体的焊接为例,能在各芯片 XY 平面布局的位置上,确定引线长度和机械运动轨迹,包括运动方向、运动速度和每一点的焊接时间以及 Z 方向上距离的控制。能够实现每个焊点的送丝、压焊、抽丝和切断等整个焊接过程的自动控制。还要能够实现焊接压力、焊接时间以及焊接温度的控制和各参数之间的配合等。

3. 超高真空变形焊设备

超高真空变形焊与冷压焊的主要区别是工作环境不同,因此这两种工艺所用的设备基本一致,只是增加了真空室和真空系统。

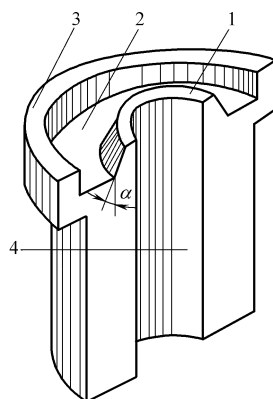


图 2-5-75 尖形复合钳口的形状

1—刃口 2—飞边溢流槽
3—护刃环 4—内腔
 α —刃口倒角 ($\alpha \leq 30^{\circ}$)

参 考 文 献

- [1] 赵熹华, 冯吉才. 压焊方法及设备 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册: 第1卷 焊接方法及设备 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [3] 中国机械工程学会, 中国材料研究学会. 中国材料工程大典: 第22卷 材料焊接工程(上) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [4] 中国机械工程学会焊接分会. 焊接词典 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [5] 全国焊接标准化技术委员会. 中国机械工业标准汇编: 焊接与切割卷(上) [M]. 2版. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [6] 成都电焊机研究所. 焊接设备选用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [7] 郑远谋. 爆炸焊接与金属复合材料 [J]. 复合材料学报, 1999, 16 (1): 1-8
- [8] 杨扬. 金属爆炸复合技术与物理冶金 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

第 3 篇

»» 钎焊基础

钎焊技术作为焊接技术的一个重要分支，在当今各高新技术领域中作为精密连接技术，得到越来越广泛的应用，是焊接技术中最活跃的研究领域。本篇首先对钎焊的基本概念、钎焊过程的基本原理及钎焊过程的影响因素进行了详细的阐述；其次对各种钎焊方法的特点及适应范围、钎焊焊接材料的性能及选用原则进行了简明扼要的介绍；最后，根据当今无铅钎焊技术的最新发展，对无铅钎焊技术的研究进展进行了介绍，重点介绍了无铅钎焊技术中的工艺方法、无铅钎焊焊接材料的发展趋势。

第 1 章 钎焊技术基础

本章阐述了钎焊过程的基本原理，对钎焊过程的两个主要阶段（润湿、铺展和界面反应）进行了比较深入的讨论，对影响润湿、铺展及界面反应的各种因素进行了理论分析。通过本章的阅读，可使读者对钎焊的基本原理有较为深刻的理解。

1.1 钎焊的基本原理

熔焊、钎焊和压焊是现代焊接技术最重要的三大组成部分。钎焊和其他焊接方法最大的差别是采用比母材熔点低的填充材料（钎料），在低于母材固相线温度、高于钎料液相线温度的操作温度下，通过熔化的钎料填充待连接母材的间隙，随后冷却凝固，形成钎焊接头。

从以上分析可知，钎焊可分为两个基本过程：一是加热使钎料熔化，液态钎料在固态母材的间隙中或表面上润湿、铺展、毛细流动；二是熔化的钎料和固态母材在固-液界面发生相互作用，导致母材的溶解和钎料合金组元向母材的扩散。由于母材和钎料中的原子通过溶解和扩散机制相互作用，从而在界面可形成原子间结合（冶金结合）。大量的研究表明，以上两个过程有可能同时进行（在润湿、铺展过程就发生了原子间的相互作用），也有可能时序上有差异，这样的过程分类，有助于清晰地理解钎焊过程的作用机理。因此可以说，钎焊是借助液态钎料填满固态母材之间的间隙并相互作用（溶解、扩散、反应）形成结合的一类连接材料的方法。

与熔焊方法相比，钎焊具有如下优点：

- 1) 钎焊温度较低，对母材组织和性能的影响较小。
- 2) 焊件变形小，尤其是采取工件整体加热的钎焊方法（如炉中钎焊）和低温钎料钎焊（软钎焊）。
- 3) 生产效率高，可以同时钎焊几十或成百条钎缝、成百上千个焊点。
- 4) 可实现异种金属、金属-非金属、非金属-非金属的连接。
- 5) 根据工况不同，可选用不同的钎料（高温、低温），显示方法的柔性。
- 6) 钎焊接头平整光滑，外形美观。

但是，钎焊也有它本身的缺点。如钎焊接头强度比较低、耐热性较差、钎焊时装配精度要求较高、钎焊时如添加钎剂，则钎焊后需要清除钎剂残渣等。

根据使用钎料的不同，美国焊接学会（AWS）将钎料液相线温度高于 450℃ 的钎焊称为硬钎焊（brazing），钎料液相线温度低于 450℃ 的钎焊称为软钎焊（soldering）。这样的分类有其历史原因。据考古发现，钎焊方法早在 5000 多年前就出现了，而硬钎焊方法的出现要早于软钎焊。当时的硬钎料是添加贵金属银、金的铜合金，用于钎焊银、金的装饰品和各种器皿。“brazing”一词来自于古法语的“braser”，动词意思为“把某物放在火上”。而古代软钎焊所使用的钎料一般认为是锡-铅合金，同样“solder”一词也来源于古法语的“soudure”，其意思为“固定在一起”。从这里不难理解，为什么把硬钎焊和软钎焊分别俗称为“铜焊”和“锡焊”，而在英语中也没有一个对应钎焊的词汇了。为了表述的方便，在国外也有人把钎料熔化温度低于 600 °F（315℃）的钎焊称为“soft soldering”，钎料熔化温度在 600 ~ 800 °F（315 ~ 425℃）之间的钎焊称为“hard soldering”，而钎料熔化温度在 900℃ 以上，在真空和保护气体中的钎焊（不加钎剂）统称为高温钎焊（high temperature brazing）。因此，要区分硬钎焊和软钎焊方法，还是以 450℃ 分类较为科学。

1.2 钎料的润湿与铺展

1.2.1 固体金属的表面结构

通过对金属材料表面结构的研究表明, 固体表面的结构存在不完整性 (即存在点缺陷、线缺陷, 甚至是体缺陷), 同时固体表面层内还存在化学组成的变化。图 3-1-1 为固体纯金属的表层结构示意图。最外层表面有一层 $0.2 \sim 0.3\text{nm}$ 的气体吸附层, 随金属性质的不同, 吸附气体的种类和厚度有一定的差别, 通常吸附的是水蒸气、氧、二氧化碳和硫化氢等气体。在气体吸附层之下有一层 $3 \sim 4\text{nm}$ 厚的氧化膜层, 大多数情况下, 氧化物的组成并不是均匀的。如铜表面在空气中形成一层氧化膜, 在靠近金属处其组成为 Cu_2O , 在靠近空气处为 CuO , 而钢则会形成三层氧化膜。氧化物的性质还和周围的环境有关, 如在干燥的空气中, 金属铝表面形成一层坚固的氧化物保护膜 ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $1 \sim 3\text{nm}$), 可阻止其进一步氧化。但在有水蒸气存在时, 氧化物就要厚得多 (10nm 以上), 并且一直不会停止生长, 在接近金属一侧是致密的无定形无水层, 接近空气一侧是厚的多孔水化层。在氧化膜层之下是一层厚度为 $1 \sim 10\mu\text{m}$ 的变形层, 这一层是由于金属在成形加工 (如压力加工) 时所形成的晶粒变形结构。在氧化膜层和变形层之间一般还有一层厚度为 $1 \sim 2\mu\text{m}$ 的微晶组织存在。

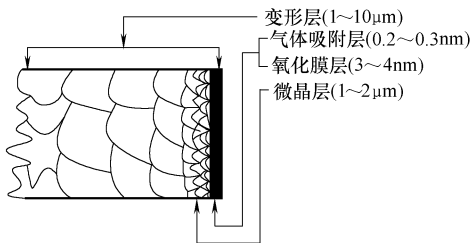


图 3-1-1 固体纯金属的表层结构示意图

对于合金表面来说, 其表面氧化膜结构要复杂得多。通常表面能较低的亲氧的组元在固态情况下也会扩散并富集于表面, 形成复杂的、多组元的表面氧化膜。随着存储时间的延长, 这层膜还会进一步增厚。

由于实际的金属母材的表面都存在氧化膜, 氧化膜的存在会妨碍钎料的润湿、铺展, 因此在钎焊前, 可根据形成的氧化膜的不同, 采用酸洗 (如盐酸、氢氟酸、硝酸、稀硫酸等) 或碱 (如氢氧化钠、氢氧化钾等) 来去除。经过酸洗或碱洗的表面仍然不是理想的清洁表面, 钎焊前还可能氧化, 形成一层较薄的氧化膜, 钎焊过程通常就是在这样的表面上进行的。

1.2.2 液态钎料对固体母材的润湿

从热力学的角度来看, 润湿是指一种流体从固体表面置换另一种流体, 从而使体系的亥姆霍兹自由能降低的过程。对于钎料的润湿过程来说, 也就是液态钎料与母材接触时, 钎料将母材表面的气体排开, 沿母材表面铺展, 形成新的固体-液体界面的过程。

在钎料铺展过程中, 假定体系的温度、压力和组成均不发生变化, 在不考虑重力做功的条件下, 体系总的亥姆霍兹自由能变化仅取决于表面亥姆霍兹自由能的变化。设固-气、液-气、固-液三相界面的比表面亥姆霍兹自由能分别为 σ_{SV} 、 σ_{LV} 、 σ_{SL} , θ 为润湿角 (图 3-1-2), 则上述过程的亥姆霍兹自由能变化可由式 (3-1-1) 表示, 即

$$dG = \sigma_{\text{SV}} dA_{\text{SL}} - \sigma_{\text{SL}} dA_{\text{SL}} - \sigma_{\text{LV}} dA_{\text{LV}} \quad (3-1-1)$$

而液-气界面面积增量 (dA_{LV}) 为

$$dA_{\text{LV}} = dA_{\text{SL}} \cos(\theta + d\theta) = dA_{\text{SL}} \cos\theta \quad (d\theta < \theta) \quad (3-1-2)$$

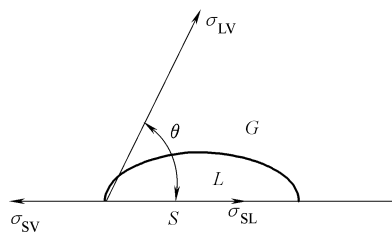


图 3-1-2 铺展过程示意图

当系统达到平衡时, $dG=0$, 并将式 (3-1-2) 代入式 (3-1-1)

则有

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{SV} - \sigma_{SL}}{\sigma_{LV}} \quad (3-1-3)$$

这就是著名的杨氏方程, 它描述了液体在固体表面铺展、达到平衡时接触角和各表面亥姆霍兹自由能之间的关系。由于固体的表面亥姆霍兹自由能、固-液界面亥姆霍兹自由能尚无合适的测定方法, 但通过接触角, 即可判断一种液体对固体的润湿性。

当 $\theta=0^\circ$ 时, 称为完全润湿; 当 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时, 称为润湿, 当 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 时, 称为不润湿; 当 $\theta=180^\circ$ 时, 称为完全不润湿。

杨氏方程虽然可以对钎焊过程进行近似的描述, 杨氏方程也可以从能量和力学的角度在平衡条件下推导, 但必须指出的是, 在钎焊过程中, 液态钎料和固态母材界面会发生相互作用, 在这种情况下进行的表面润湿、铺展就更为复杂。另一方面, 从力平衡的角度来看, 杨氏方程是不完整的, 它没有考虑垂直方向的力的平衡问题。如在 SMT (Surface Mount Technology) 组装过程出现的“曼哈顿”(Manhattan effects) 现象 (图 3-1-3), 对于 A 点, 如果元器件在重力作用下产生的力矩和水平方向表面张力分量产生的力矩满足式 (3-1-4), 则不会产生“曼哈顿”现象, 否则元器件会发生向右的侧倾。这个例子从侧面说明杨氏方程本身就是不完整的。

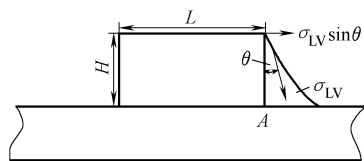


图 3-1-3 产生“曼哈顿”现象示意图

$$\frac{1}{2}mgL \geq \sigma_{LV} \sin\theta \quad (3-1-4)$$

在实际的钎焊过程中, 有时还会涉及液态钎料的铺展快慢问题, 即铺展动力学, 它对钎缝是否产生缺陷有极大的影响。

当放一小滴液滴在可润湿的固态母材上时, 在不考虑固-液界面存在相互作用时, 三点线 (Triple Point Line, TPL) 的位置随时间的变化关系可用式 (3-1-5) 描述:

$$r(t) = (V_0)^{3/10} \left(\frac{\sigma_{LV} t}{\eta} \right)^{1/10} \quad (3-1-5)$$

对式 (3-1-5) 求导, 可得

$$\dot{r}(t) = \frac{1}{10} (V_0)^{3/10} \left(\frac{\sigma_{LV}}{\eta} \right)^{1/10} t^{-9/10} \quad (3-1-6)$$

式中 V_0 ——常数;

η ——液体的粘度, 单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

t ——时间, 单位为 s 。

式 (3-1-6) 表明, 液体的铺展速率只和液体的表面张力、粘度有关。表面张力越大, 铺展速率越大; 粘度越大, 铺展速率越慢。在液体铺展初期, 铺展速率极大, 随着时间的延长, 铺展速率以指数规律迅速降低。

钎焊时润湿铺展过程远比式 (3-1-6) 表示的润湿动力学复杂得多, 除了以上粘度控制的毛细力作用下的流动之外, 还包括如下影响因素:

- 1) 液态钎料组元在母材表面的扩散。
- 2) 母材溶解进入液态钎料。
- 3) 液态钎料扩散进入母材。
- 4) 在液态钎料组元和母材组元之间的化学反应。

所有这些因素都将对润湿动力学产生影响。如用 Cu-P 钎料钎焊铜、Al-Si 钎料钎焊铝、Ni 基钎料钎焊高温合金表现出溶解润湿动力学特征；而用 Sn 基钎料钎焊铜，却显示扩散控制的润湿动力学特征；陶瓷活性钎焊则显示出反应控制的典型特点。一般来说，对于确定的钎料—母材体系，都有几种机制作用，这就使润湿、铺展问题异常复杂，建立润湿动力学模型也就非常困难。对于这方面的研究还处于不断发展、完善的过程中。

1.3 钎料的毛细流动

1.3.1 拉普拉斯方程的推导

由于液体具有表面张力，液面往往显示不同程度的弯曲，弯曲液面的一个根本特性就是曲面两侧存在压力差。例如，用一根小管吹肥皂泡后，必须把管的另一端堵住，泡才能存在，否则就自行收缩了。这就是因为弯曲液面两侧有压力差。此压力差与体系的关系可推导如下：

设容积一定的箱中有一液滴，箱中大气压力为 p ，液滴内部压力为 $p' = p + \Delta p$ ，根据平衡条件，在恒温时，

$$dG = -p'dV_l - p dV_g + \sigma dA = 0 \quad (3-1-7)$$

其中，下标 l 和 g 分别表示液体和气体。因为体系总体积恒定， $dV_l = -dV_g$ ，可得

$$(p - p')dV_l + \sigma dA = 0 \quad (3-1-8)$$

于是：

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{dA}{dV_l} \right) \quad (3-1-9)$$

考虑任意曲面上的一个小面积元 $ABCD$ ，其主半径为 R_1 及 R_2 （图 3-1-4）。体积扩大 dV 时，液面扩大 dA ，面积元变为 $A'B'C'D'$ 。相应地 AB 边长由 x 变为 $x + dx$ ， BC 边长由 y 变为 $y + dy$ ， AA' 的距离为 dz ，于是面积增量为

$$dA = (x + dx)(y + dy) - xy = xdy + ydx \quad (3-1-10)$$

体积增量（曲面移动扫过的体积）为

$$dV = xydz \quad (3-1-11)$$

式 (3-1-9) 变为

$$\Delta p = \sigma \frac{xdy + ydx}{xydz} \quad (3-1-12)$$

由相似三角形的比较可知：

$$\frac{x + dx}{R_1 + dz} = \frac{x}{R_1} \quad \text{或} \quad dx = \frac{x}{R_1} dz \quad (3-1-13)$$

$$\frac{y + dy}{R_2 + dz} = \frac{y}{R_2} \quad \text{或} \quad dy = \frac{y}{R_2} dz \quad (3-1-14)$$

代入式 (3-1-12) 可得

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (3-1-15)$$

若液面为球形， $R_1 = R_2 = R$ ，式 (3-1-15) 变为

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R} \quad (3-1-16)$$

式 (3-1-15) 就是著名的拉普拉斯方程。一般情况下，凸液面的液相压力大于气相， $\Delta p > 0$ ， R 取正值；凹液面的液相压力小于气相， $\Delta p < 0$ ，

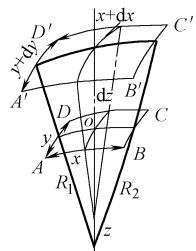


图 3-1-4 任意曲面元的扩大示意图

R 取负值；若为平液面时，则两相压力相等， $\Delta p = 0$ ， $R \rightarrow \infty$ 。

1.3.2 液态钎料的毛细填缝过程

钎焊时，对液态钎料的要求主要不是沿固态母材表面的自由铺展，而是填满钎缝的全部间隙。通常钎缝间隙很小，如同毛细管，钎料是依靠毛细作用在钎缝间隙内流动的。因此，钎料能否填满钎缝间隙取决于它在母材间隙中的毛细流动特性。拉普拉斯方程是有关流体界面的基本公式，是对许多界面现象作出定量解释的基础。拉普拉斯方程为研究钎料的填缝过程提供了理论基础。

1. 液态钎料在垂直平行板中的填充特性

当将两互相平行的金属板垂直插入液态钎料中时，假设平行金属板无限大，钎料量无限多。由于存在毛细作用，如果钎料可以润湿金属板，则液态钎料会自动上升到高于液面的一定高度；若钎料不润湿金属板，则液态钎料将下降到低于液面的一定高度。由于液面弯曲产生附加压力，导致液面上升或下降，因此可用拉普拉斯方程来求解最大上升高度及爬升速度。

(1) 最大上升高度 当平行板所构成的间隙为 a ，弯曲液面的曲率半径为 $R_1 \rightarrow \infty$ ， $R_2 = a/2$ ，则 $a = -2R\cos\theta$ ，根据拉普拉斯方程，液面两侧的压力差为

$$\Delta p = p_L - p_V = -\frac{2\sigma_{LV}\cos\theta}{a} \quad (3-1-17)$$

当 $\theta < 90^\circ$ 时， $\cos\theta$ 是正的， Δp 为负，液面下液相压力小于气相压力，平衡时液面必上升 h ，以达到

$$\frac{2\sigma_{LV}\cos\theta}{a} = \rho gh \quad (3-1-18)$$

式中 ρ ——液体的密度，单位为 g/cm^3 ；

g ——重力加速度，单位为 m/s^2 。

此时最大爬升高度为

$$h = \frac{2\sigma_{LV}\cos\theta}{\rho ga} \quad (3-1-19)$$

将杨氏方程代入式 (3-1-19)，可得

$$h = \frac{2(\sigma_{SV} - \sigma_{SL})}{\rho ga} \quad (3-1-20)$$

由式 (3-1-19) 和式 (3-1-20) 可见：当 $\theta < 90^\circ$ 时， $\cos\theta > 0$ ，即在钎料润湿母材时， $h > 0$ ，液态钎料沿间隙上升；当 $\theta > 90^\circ$ 时， $\cos\theta < 0$ ，即钎料不润湿母材， $h < 0$ ，液态钎料沿间隙下降。因此，钎料填充间隙的好坏取决于它对母材的润湿性。此外，钎料沿间隙上升的高度 h 与间隙大小 a 成反比。从上升高度来看，设计钎焊接头时，接头间隙应尽量小些。

(2) 爬升速度 由于凹的弯液面对液体产生一个负的压力，液面在任一位置 y 的上升的驱动力应为负的附加压力与重力产生的压力差，即

$$\Delta p = \rho gy - \frac{2\sigma_{LV}\cos\theta}{a} \quad (3-1-21)$$

根据泊肃叶 (Poiseuille) 定律可知：不可压缩牛顿流体在圆管中作定常层流时，体积流量正比于比压降和管半径的四次方，反比于流体的粘度，即

$$Q = \frac{\pi}{8\eta} \frac{dp}{dx} R^4 \quad (3-1-22)$$

流体在圆管断面上的平均速度可表示为

$$V = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{R^2}{8\eta} \frac{dp}{dx} \quad (3-1-23)$$

将式 (3-1-21) 代入式 (3-1-23), 可得液面在任一爬升高度时的爬升速度为

$$V = \frac{dy}{dt} = -\frac{a^2}{8\eta y} \left(\rho g y - \frac{2\sigma_{LV} \cos\theta}{a} \right) = \frac{a\sigma_{LV} \cos\theta}{4\eta y} - \frac{a^2 \rho g}{8\eta} \quad (3-1-24)$$

当 y 很小, a 也很小时, 式 (3-1-24) 的第二项可以忽略, 于是可简化成

$$V = \frac{dy}{dt} = \frac{a\sigma_{LV} \cos\theta}{4\eta y} \quad (3-1-25)$$

从式 (3-1-25) 可以看出, 钎料润湿性越好, 钎料的流动速度越大; 液体的粘度越大, 流速越小; 母材间隙越大, 填缝速度越快。其次, 钎料的爬升速度和爬升高度成反比, 即液体在间隙内刚开始上升时流动快, 以后随高度的增加而逐渐变慢。这一性质对钎焊接头设计及钎焊工艺优化有指导意义。

2. 液态钎料在水平平行板中的填充特性

液态钎料在水平位置平行间隙中的填缝更接近于实际的钎焊情况。由于间隙处于水平位置, 液态钎料填缝时的附加压力与重力垂直, 所以重力不起抵消附加压力的作用。

当液态钎料润湿母材时, 钎料填缝的附加压力为

$$\Delta p = -\frac{2\sigma_{LV} \cos\theta}{a} \quad (3-1-26)$$

根据泊肃叶流速方程, 可得水平平行板的填缝速度为

$$V = \frac{dy}{dt} = \frac{a\sigma_{LV} \cos\theta}{4\eta y} \quad (3-1-27)$$

积分后得填缝长度和填缝时间的关系为

$$y^2 = \frac{a\sigma_{LV} \cos\theta}{2\eta} t \quad (3-1-28)$$

从式 (3-1-27) 和式 (3-1-28) 可以看出, 在考虑钎料润湿母材的条件下, 间隙越大、粘度越小, 钎料的填充速度越快。在刚开始填充时的流动速度最大, 而后呈反比递减。其次, 填缝长度和填缝时间呈抛物线规律变化。如果钎料无限多, 填缝过程可以一直进行下去。这在实际钎焊过程中是不可能出现的, 因为在实际钎焊过程中, 母材和熔化的钎料之间有相互作用, 致使粘度变化, 钎缝中的缺陷也会阻碍钎料的流动。

3. 单板垂直插入液态钎料时的润湿特性

单板垂直插入液态钎料试验方法又称为吊片法, 是 Wilhelmy 在 1863 年首先提出的。该方法被广泛应用于软钎焊润湿性和钎焊性评估 (图 3-1-5)。当垂直的金属板插入液态钎料槽时, 如果液态钎料润湿金属板, 则润湿的弯月面在液面上方上升一段距离 h , 这个弯月面对金属板施加一个向下的、等于弯月面重量的力。正是这个表面弯曲产生的附加压力, 引起液面的上升。

假设液态钎料无限多, 液体体积在试验过程中是不变的, 根据 Goodrich 考虑整个毛细系统的势能为每单位深度的能量积分, 可得

$$p = \int_0^\infty \left\{ \frac{1}{2} \rho g \psi^2 + \sigma_{LV} \left[1 + \left(\frac{d\psi}{dx} \right)^2 - 1 \right] \right\} dx \quad (3-1-29)$$

$Y = \Psi(x)$ 为弯月面形状函数, 联立的 Euler-Lagrange 方程为

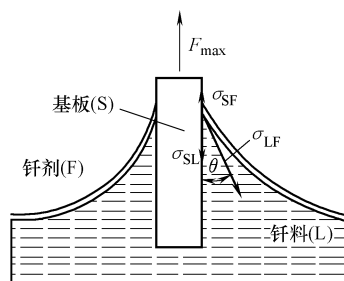


图 3-1-5 润湿垂直板的弯液面形状

$$\rho g \psi = \frac{\sigma_{LV} \frac{d^2 \psi}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{d\psi}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (3-1-30)$$

满足式 (3-1-30) 的弯月面的形状函数为:

$$\psi^2 = \frac{2\sigma_{LV}}{\rho g} (1 - \sin\theta) \quad (3-1-31)$$

因此, 满足毛细升高的固-液-气三点线 (TPL) 到液面的高度为

$$h^2 = \frac{2\sigma_{LV}}{\rho g} (1 - \sin\theta) \quad (3-1-32)$$

平衡时的最大润湿力 (或弯月面的重量, W) 可由式 (3-1-33) 给出 (图 3-1-5):

$$F = W = \sigma_{LV} L \cos\theta \quad (3-1-33)$$

式中 L ——铜板浸入液态钎料的周线长度 (mm)。

通过测量最大润湿力 F 和润湿高度 h , 联立方程 (3-1-32) 和方程 (3-1-33), 可以求出系统的表面张力和平衡润湿角如下:

$$\sigma_{LV} = \frac{\rho g}{4} \left[\frac{4W^2}{(\rho g L h)^2} + h^2 \right] \quad (3-1-34)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{4W^2 - (\rho g L h)^2}{4W^2 + (\rho g L h)^2} \right] \quad (3-1-35)$$

另一方面, 通过 Wilhelmy 法, 还可以连续测量润湿力。在金属板刚接触钎料液面的时候, 浮力大于润湿力, 一旦润湿开始, 润湿力快速提拉弯月面到金属板上, 直到平衡建立。典型的润湿力—时间曲线如图 3-1-6 所示。通过润湿力和润湿时间的比较, 可以对系统的润湿性及钎焊性进行定性的评估。如果能对爬升高度和润湿角实时检测, 则可对系统的润湿动力学进行研究 (即随时间变化的三点线的运动轨迹和润湿角的变化规律)。

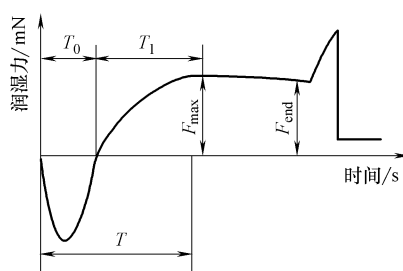


图 3-1-6 润湿力随润湿时间变化曲线示意图

1.4 钎料润湿性的影响因素

钎焊时, 无论采用什么样的钎焊接头形式, 都可用润湿角来最终评价钎料—母材系统的钎焊润湿性。由杨氏方程可知, 任何使三相表面张力 (σ_{SL} 减小、 σ_{LV} 减小、 σ_{SV} 增大) 发生变化, 从而使接触角 θ 发生变化 (减少) 的因素都将影响钎料对母材的润湿性。从物理意义上说, 如使 σ_{LV} 减小, 意味着液体内部原子对表面原子的吸引力减弱, 液体原子容易克服本身受到的引力趋向液体表面, 使液体的表面积增大, 钎料容易铺展。 σ_{SL} 减小, 表明固体原子对液体原子的吸引力增大, 使液体的内层原子容易被拉向固-液界面, 即容易铺展。而 σ_{SV} 增大, 说明固体的内部原子对表面原子的吸引力增大, 表面原子处于高能态。钎焊时, 固-气界面被固-液界面取代时释放更大的表面亥姆霍兹自由能, 因此有利于钎料的铺展。

表 3-1-1、表 3-1-2 和表 3-1-3 分别列出了一些液态纯金属在其熔点时的表面张力、一些固态金属的表面张力以及一些金属系统的界面张力的数据。由表中的数据可以看出, 一定的物质, 在温度、压力和成分一定的情况下, 其界面张力是一定的。不同的物质, 即使在相同的温度、压力条件下, 其界面张力也不同。当一相的物性不变, 而改变与之相邻的另一相的物性时, 界面张力也将发生变化。

表 3-1-1 液态金属元素在其熔点时的表面张力

金属元素	σ_{LV} /(N/m)	金属元素	σ_{LV} /(N/m)	金属元素	σ_{LV} /(N/m)	金属元素	σ_{LV} /(N/m)
Ag	0.966	Cu	1.303	Na	0.191	Si	0.865
Al	0.914	Fe	1.872	Nb	1.900	Sn	0.56
Au	1.169	Ga	0.718	Nd	0.689	Sr	0.303
B	1.060	Ge	0.621	Ni	1.778	Ta	2.150
Ba	0.277	Hf	1.630	Pb	0.458	Te	0.180
Be	1.390	Hg	0.498	Pd	1.500	Ti	1.650
Bi	0.378	In	0.556	Pt	1.800	Tl	0.464
Ca	0.361	K	0.115	Pu	0.550	V	1.950
Cd	0.570	La	0.720	Rb	0.085	W	2.500
Ce	0.740	Li	0.398	Rh	2.000	Zn	0.782
Co	1.873	Mg	0.559	Ru	2.250	Zr	1.480
Cr	1.700	Mn	1.090	Sb	0.367		
Cs	0.070	Mo	2.250	Se	0.106		

表 3-1-2 一些固态金属的表面张力

金属	温度/℃	σ_{SV} /(N/m)
Fe	20	4.0
Fe	1400	2.1
Cu	1050	1.43
Al	20	1.91
M	20	0.70
W	20	6.81
Zn	20	0.86

表 3-1-3 一些金属系统的界面张力

系 统	温度/℃	σ_{SV} /(N/m)	σ_{LV} /(N/m)	σ_{SL} /(N/m)
Al-Si	350	1.01	0.60	0.28
Al-Si	600	1.01	0.56	0.25
Cu-Ag	850	1.67	0.94	0.28
Fe-Cu	1100	1.99	1.12	0.44
Fe-Ag	1125	1.99	0.91	>3.40
Cu-Pb	800	1.67	0.41	0.52

1.4.1 钎料和母材的成分

大量研究表明，钎料和母材的成分对润湿性的影响主要表现为钎焊过程中的液态钎料和固态母材是否有相互作用。其规律性可表述为钎料和母材在液态和固态均不相互作用，则它们的润湿性很差；若钎料和母材能相互溶解或形成化合物，则液态钎料能较好地润湿母材。这是因为：在假设固-气、液-气表面张力不变时，若母材溶解或母材和钎料某组元发生反应，说明参与溶解或反应的原子之间有较大吸引力，因此固-液界面张力下降，润湿性提

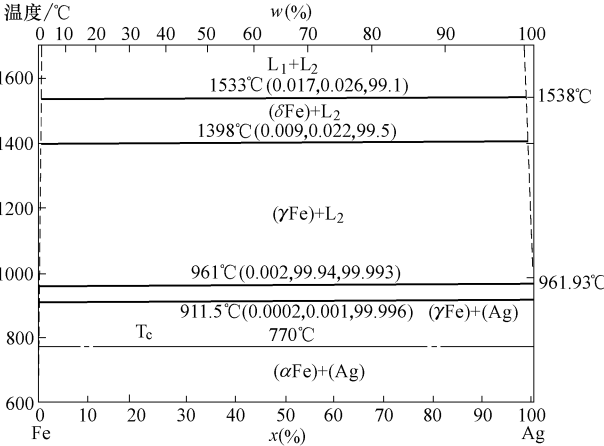


图 3-1-7 Fe-Ag 二元合金相图

高。如 Fe-Ag 系（相图见图 3-1-7），Ag 和 Fe 在固、液态下均不相互作用，说明 Fe、Ag 原子之间的吸引力极小，不足以将液态 Ag 内的原子拉到固-液界面，因此无法扩大其表面积，润湿性差。从表 3-1-3 也可以看出，在 1125℃ 时液态 Ag 与固态 Fe 间的界面张力大于 3.40N/m，实测的润湿角 $\theta > 90^\circ$ ，不发生润湿。又如，在 780℃ 时 Ag 在 Cu 中的固溶度（质量分数）为 8%（相图见图 3-1-8），因而 Ag 在 Cu 上的润湿性极好。从表 3-1-3 也可以看出，在 850℃ 时 Ag-与 Cu 的界面张力为 0.28N/m，大大低于 Fe-Ag 系的表面张力。

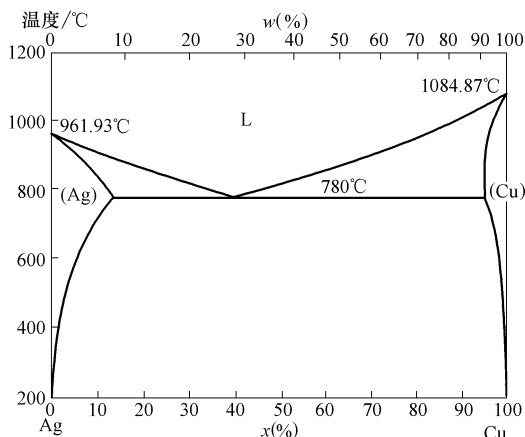


图 3-1-8 Ag-Cu 二元合金相图

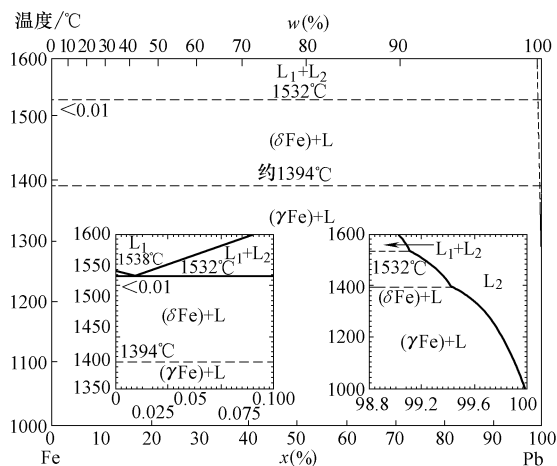


图 3-1-9 Fe-Pb 二元合金相图

对同一母材，如果改变钎料的成分，只要钎料中的某组元和母材或母材中的某组元有相互作用，就会改善钎料对母材的润湿性。如 Fe-Pb 系（相图见图 3-1-9），Pb 和 Fe 几乎不互溶，也不形成金属间化合物，即原子间的相互作用很弱，故 Pb 对钢的润湿性很差。但 Pb

中加入能与钢形成共同相的 Sn 后（Fe-Sn 相图见图 3-1-10），钎料在钢上的润湿角减小。含 Sn 量越多，润湿性越好。从以上分析可知，对于那些与母材无相互作用因而润湿性差的钎料，通过在钎料中加入能与母材形成共同相的合金元素，可以改善它对母材的润湿性。钎料合金化为研发新钎料提供了一个方法，但除了润湿性外，钎料的其他性能还需要考虑。

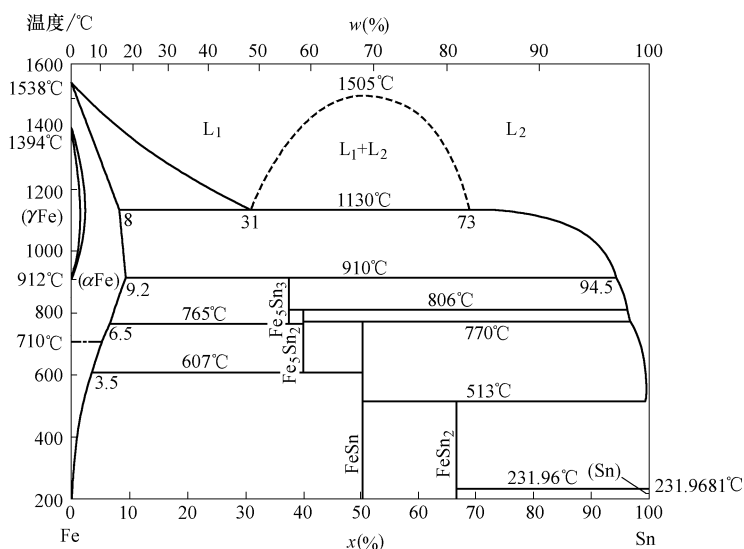


图 3-1-10 Fe-Sn 二元合金相图

1.4.2 温度的影响

一般来说，液相的表面张力随温度的升高呈现下降的趋势。当液相的温度升高到临界温度 T_c 时，液-气界面将消失，此时的表面张力为零。众所周知，表面张力的存在有两个前提条件：一是

组成液相的原子间存在相互作用；二是表面两侧的两相（气相和液相）密度不同。此二因素均与温度有关。温度增加，原子间作用力减弱，两相密度差变小，因此必然导致表面张力减小。

约特佛斯（Eotvos）定律给出了温度和表面张力的关系式为

$$\sigma = \frac{K}{V_m^{\frac{2}{3}}} (T_c - T) \quad (3-1-36)$$

式中 V_m ——液体的摩尔体积，单位为 m^3/mol 。

K ——常数，近似等于 $6.4 \times 10^{-8} \text{J}/(\text{K} \cdot \text{mol}^{2/3})$ ；

T_c ——临界温度（表面张力趋于零的温度），单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

拉姆齐（Romsay）和希尔茨（Shields）等人对式（3-1-35）进行了修正，给出

$$\sigma = \frac{k}{V_m^{\frac{2}{3}}} (T_c - T - \tau) \quad (3-1-37)$$

式中 τ ——温度常数（在接近临界温度时， $\tau = 6.0$ ）

为探讨表面张力随温度的变化规律，可将 Eotvos 定律对温度 T 微分，得到表面张力的温度系数为

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{k}{V_m^{\frac{2}{3}}} \left[\frac{2(T_c - T)}{3\rho} \frac{d\rho}{dT} - 1 \right] = \frac{\sigma}{T_c - T} \left[\frac{2(T_c - T)}{3\rho} \frac{d\rho}{dT} - 1 \right] \quad (3-1-38)$$

从式（3-1-38）可知，随着温度的增加，液相的密度减小， $d\rho/dT < 0$ ，因此表面张力的温度系数 $d\sigma/dT < 0$ ，说明随温度的增加，表面张力总是减小。另一方面，当 $d\rho/dT = 0$ （不考虑温度变化对密度的影响）， $d\sigma/dT = \text{常数}$ ，这表明在高于液相熔点附近的温度区间，表面张力随温度升高的趋势符合线性规律；而在高于熔点较多的温度区间， $d\sigma/dT \neq \text{常数}$ ，同时， $V = f(\rho)$ 也随着密度的变化而变化，此时密度的温度系数就不能忽略，因此表面张力随温度变化的线性规律不成立。这一结论和试验结果相符。

在钎焊过程中，除了温度的升高，液相钎料的表面张力减小，致使液态钎料的润湿性得到提高外，温度升高也会加剧母材和液态钎料的相互反应，降低固-液界面张力，同时还可以降低液态钎料的粘度，促进钎料的流动。这一系列因素的作用，都将提高钎料对母材的润湿。但并不是加热温度越高越好，温度过高，钎料的润湿性太强，往往造成钎料流失，即钎料流散到不需要钎焊的地方。温度过高还会引起母材晶粒长大、溶蚀等现象。因此必须全面考虑钎焊加热温度的影响。

1.4.3 金属表面氧化物的影响

金属表面总是存在着氧化物，而金属氧化物本身的表面张力比金属的表面张力要低得多。如 Fe_2O_3 、 CuO 、 Al_2O_3 的表面张力分别为 $\sigma_{\text{sv}} = 0.35 \text{N/m}$ 、 0.76N/m 、 0.56N/m （纯金属在熔点时的表面张力见表 3-1-1）。根据杨氏方程，液体润湿固体时要满足的基本条件是 $\sigma_{\text{sv}} > \sigma_{\text{sl}}$ 。而覆盖着氧化膜的母材表面比起无氧化膜的洁净表面，表面张力显著减小，致使 $\sigma_{\text{sv}} < \sigma_{\text{sl}}$ ，导致液态钎料形成球状（ $\theta > 90^{\circ}$ ），出现不润湿现象。另外许多钎料合金表面也存在一层氧化膜，而且氧化物的熔点一般都比较低，在钎焊温度下为固态。当钎料熔化后被自身的氧化膜包覆，此时其与母材之间是两种固态的氧化膜之间接触，因此也不产生润湿。

一般钎料都为多元合金，其形成的氧化膜就要考虑合金系中的组元和氧的亲合力及是否能降低表面能而向界面偏聚（形成正吸附），这样的组元即使在固体状态也在不停地向表面扩散，加热时就更加明显。例如，含铝、钛沉淀强化的高温合金，虽然铝、钛含量较少，但加热时的表面氧化膜几乎都是 Al_2O_3 ；含镁的铝合金尽管镁含量很少，在表面膜中也明显出现 MgAlO_3 相。不同的氧化膜对钎料的润湿性的影响不同。母材氧化膜的去除，保证了钎料的正常润湿，是钎焊过程的一个重要环节，了解母材表面氧化膜的组成、性质是非常必要的。

1.4.4 钎剂的影响

去除氧化膜最有效的方法是采用钎剂。当用钎剂去除了母材和钎料表面的氧化膜后，液态钎料就可以和母材金属直接接触，从而改善润湿性。钎剂改善钎料润湿性的原因可用杨氏方程解释（图 3-1-11），当钎料和金属表面覆盖了一层钎剂后，它们之间的界面张力发生了变化，液态钎料终止铺展时的平衡方程为

$$\sigma_{SF} = \sigma_{SL} + \sigma_{LF} \cos \theta \quad (3-1-39)$$

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{SF} - \sigma_{SL}}{\sigma_{LF}} \quad (3-1-40)$$

式中 σ_{SF} ——固体同液态钎剂的界面张力，单位为 N/m；

σ_{LF} ——液态钎料与液态钎剂间的界面张力，单位为 N/m；

σ_{SL} ——液态钎料与母材间的界面张力，单位为 N/m。

由式（3-1-40）可以看出，要提高润湿性，即减小 θ 角，必须增大 σ_{SF} ，减小 σ_{LF} 和 σ_{SL} 。钎剂的作用，除能清除母材表面氧化物使 σ_{SF} 增大外（满足 $\sigma_{SF} > \sigma_{SV}$ ），也能减小液态钎料的界面张力 σ_{LF} 。液态钎剂降低液态钎料表面张力的作用机制可用 Antonoff 规则解释：两相互饱和的液相所构成的液-液界面张力为二者表面张力之差，即

$$\sigma_{a,b} = |\sigma_a - \sigma_b| \quad (3-1-41)$$

Gibbs 从表面能的观点导出类似的规律。他认为，高表面能液体为较低表面能的液体饱和时，低表面能的液体将在高表面能液体上吸附，使表面能降低。在钎焊过程中，若施加钎剂时，液态钎料的表面张力就从液-气表面张力转化为液-液界面张力。根据 Antonoff 规则和产生表面张力的密度差条件，一定有 $\sigma_{LF} < \sigma_{LV}$ 。另一方面，钎剂中若存在重金属化合物，根据 Gibbs 的观点，可以得出在液态钎剂和液态钎料、固体母材之间，会发生钎剂中的金属离子的传质过程。当钎剂和钎料发生传质现象时，可使钎料合金化；当钎剂和母材发生传质现象时，可降低固-液界面张力（ σ_{SL} ），使钎料润湿性增加。因此，施加钎剂可显著提高钎料的润湿性。

1.4.5 母材表面粗糙度的影响

液体润湿固体时，满足杨氏方程的条件是：液体在表面理想光滑的、各向同性的和没有变形的固体表面上的润湿。对于真实的表面，母材的表面由于加工方法不同，都不同程度地存在表面凹凸不平的现象，绝对光滑的表面是不可能的。一般来说，当母材表面比较粗糙时，表面的纵横交错的沟槽对液态钎料的铺展起到毛细管的作用，从而促进钎料的润湿。因此，母材的表面粗糙度会影响钎料的润湿性。

将一液滴置于一粗糙表面，液滴在固体表面铺展后的微观润湿情况可用图 3-1-12 表示。 θ 为表观接触角， θ_i 为本征接触角（固体表面分子距离的接触角），液体在固体表面上的本征接触角几乎是无法测量的，试验测得的只是其表观接触角。而表观接触角与界面张力的关系是不符合杨氏方程的，但应用热力学可以导出与杨氏方程类似的关系式。

根据界面亥姆霍兹自由能的定义：

$$\sigma = \left(\frac{\partial G}{\partial A} \right)_{T,P} \quad (3-1-42)$$

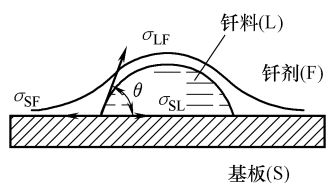


图 3-1-11 钎料-母材-钎剂系统平衡时的界面张力

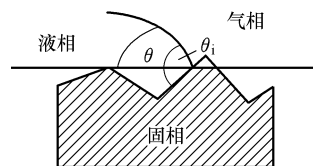


图 3-1-12 液滴在真实表面上的润湿情况

在恒温、恒压的平衡状态下, 由于界面的微小变化引起体系亥姆霍兹自由能的变化如下:

$$dG = \frac{\partial G}{\partial A_{SV}} \frac{\partial A_{SV}}{\partial a_{SV}} da_{SV} + \frac{\partial G}{\partial A_{SL}} \frac{\partial A_{SL}}{\partial a_{SL}} da_{SL} + \frac{\partial G}{\partial A_{LV}} \frac{\partial A_{LV}}{\partial a_{LV}} da_{LV} = 0 \quad (3-1-43)$$

式中 A ——本征界面面积 (真实的界面面积), 单位为 mm^2 ;

a ——表观界面面积 (即几何面积), 单位为 mm^2 。

式 (3-1-42) 两端除以 da_{SV} 得

$$\frac{dG}{da_{SV}} = \frac{\partial G}{\partial A_{SV}} \frac{\partial A_{SV}}{\partial a_{SV}} + \frac{\partial G}{\partial A_{SL}} \frac{\partial A_{SL}}{\partial a_{SL}} \frac{da_{SL}}{da_{SV}} + \frac{\partial G}{\partial A_{LV}} \frac{\partial A_{LV}}{\partial a_{LV}} \frac{da_{LV}}{da_{SV}} = 0 \quad (3-1-44)$$

由于固-气界面减少的面积等于固-液界面增加的面积, 故 $da_{SV} = -da_{SL}$, 又由于液-气界面面积的变化率和固-液界面面积的增加率满足 $\frac{da_{LV}}{da_{SL}} = \cos\theta$, 令 $\gamma = \frac{A}{a} = \frac{dA}{da}$, 则式 (3-1-44) 即可转换成

$$\gamma(\sigma_{SF} - \sigma_{SL}) = \sigma_{LF} \cos\theta \quad (3-1-45)$$

或

$$\cos\theta = \frac{\gamma(\sigma_{SF} - \sigma_{SL})}{\sigma_{LF}} \quad (3-1-46)$$

此即威舍尔 (Wenzel) 方程。将威舍尔方程与杨氏方程比较可得

$$\gamma = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_i} \quad (3-1-47)$$

式中 θ ——在粗糙度为 γ 的表面上的接触角 (表观接触角);

θ_i ——具有原子 (分子) 水平平整表面上的接触角 (本征接触角);

γ ——粗糙因子, 真实平面的表面积与理想平面的表面积之比, $\gamma \geq 1$ 。

由式 (3-1-47) 可以看出, 当 $\theta_i < 90^\circ$ 时, $\theta < 0$, 即粗糙的表面比光滑的表面较易为液体所润湿, 因而在粗糙金属表面上的表观接触角更小。当 $\theta_i > 90^\circ$ 时, $\theta > 0$, 即表面粗糙化后, 金属表面上的表观接触角更大。

从威舍尔方程的导出可知, 威舍尔方程仅考虑了真实表面与理想表面面积的差异, 而没有考虑真实表面具体的特征。实际上, 对于同心沟槽和放射形沟槽来说, 在表面粗糙度相同的情况下, 其润湿角 θ' 却可能不同。所以威舍尔方程应修正为

$$\cos\theta' = \cos\theta [\gamma(R-1)\psi] \quad (3-1-48)$$

式中 ψ ——表面结构因子;

R ——液滴半径, 单位为 mm 。

在液体润湿固体的过程中, 还有一个现象值得关注。即当润湿过程结束后, 液滴的润湿角存在一个范围, 润湿角并不是处处都相等。通常定义最大的接触角为前接触角 (θ_a), 最小的接触角为后接触角 (θ_r)。液滴的接触角的不均匀性现象称为接触角滞后, 这就好像液滴在倾斜的固体表面上润湿 (图 3-1-13)。通常, 后接触角和前接触角可分别表示如下:

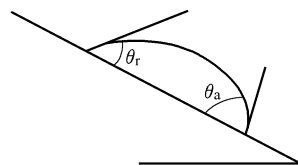


图 3-1-13 倾斜表面液滴的接触角

$$\theta_r = \theta_m - \frac{\Delta\theta}{2} \quad (3-1-49)$$

$$\theta_a = \theta_m + \frac{\Delta\theta}{2} \quad (3-1-50)$$

式中 θ_r ——后接触角;

θ_a ——前接触角;

$\Delta\theta$ ——接触角滞后;

θ_m ——平均接触角。

引起接触角滞后的原因涉及表面粗糙度的不均匀性、表面吸附等因素。表面越光洁, $\Delta\theta$ 越小; 表面粗糙度越大, $\Delta\theta$ 越大。表面粗糙度的影响有两个方面, 一是障碍效应, 二是沟槽效应。

在实际钎焊过程中, 不同钎料在不同状态的表面上的润湿情况也不同。如将铜和防锈铝合金分别采用抛光、钢丝刷刷、砂布打磨和化学清洗的方法来进行表面处理。在铜片中心放置 Sn-40Pb 钎料, 在铝合金片中心放置 Sn-20Zn 钎料进行铺展试验。结果表明: 在铜试片上, 用钢丝刷刷过的试样铺展面积最大, 抛光试样面积最小; 但在铝合金试片上, 铺展面积几乎相同。这是由于钢丝刷刷过的表面粗糙度最大, 表观接触角减小, 表现为铺展面积增大; 而抛光表面的粗糙度最小, 使其表观接触角增大, 故铺展面积小。而对于铝合金来说, 由于钎料与母材之间的相互作用十分强烈, 母材的显微不平迅速溶解进入钎料, 从而降低了表面粗糙度的影响, 使得各部分的铺展面积基本相同。

1.4.6 表面活性物质的影响

在钎焊过程中, 当钎料为多元合金时, 由于合金组分对界面张力的影响不同, 使钎料合金中的某种组元被有选择地吸附(或排斥)到相界面上(或离开相界面)。根据最小吉布斯自由能原理, 如果某组元能降低界面张力, 则该组元一定会被吸附到界面上来, 从而使该组元的表相大于体相浓度。反之, 如果某组元是使固-液相界面张力增大, 则会被排斥离开界面, 从而使该组元的表相浓度低于体相浓度。前者称为“正吸附”, 后者称为“负吸附”。

在等温、等压条件下, 吸附平衡时 ($dG = 0$), Gibbs-Duhem 吸附公式可表示为

$$A d\sigma + \sum \mu_i^s dn_i^s = 0 \quad (3-1-51)$$

式中 σ ——界面张力, 单位为 N/m;

A ——表面面积, 单位为 mm^2 ;

μ_i^s ——组元 i 在界面相中的化学位;

n_i^s ——组元 i 在界面相中的摩尔数。

可将式 (3-1-51) 变为

$$-d\sigma = \frac{\sum d\mu_i^s dn_i^s}{A} = \sum \Gamma_i d\mu_i^s \quad (3-1-52)$$

式中 Γ_i ——组元的吸附量, 即单位面积的相界面上溶质比体相多出的物质量 (mol/cm^2)。

对于二元体系, 假定 $\Gamma_1 = 0$, 即假定溶剂不发生吸附, 则式 (3-1-52) 变为

$$-d\sigma = \frac{\sum d\mu_i^s dn_i^s}{A} = \sum \Gamma_2 d\mu_2^s \quad (3-1-53)$$

由于平衡时体相的化学位与其表相的化学位相等, 即 $\mu_2^s = \mu_2^b$, 由热力学关系可知:

$$\mu_2^b = \mu_2^{\oplus b} + RT \ln a_2 \quad (3-1-54)$$

将式 (3-1-54) 代入式 (3-1-53) 可得

$$-d\sigma = \Gamma_2 RT d(\ln a_2) = \Gamma_2 RT \frac{da_2}{a_2} \quad (3-1-55)$$

或写成

$$\Gamma_2 = -\frac{a_2}{RT} \frac{d\sigma}{da_2} \quad (3-1-56)$$

此即二组分实际溶液界面吸附时的吉布斯等温式。对于稀溶液来说, 可以使用浓度 C 来代替活度 a , 即

$$\Gamma_2 = -\frac{C}{RT} \frac{d\sigma}{dC} \quad (3-1-57)$$

当 $d\sigma/dC < 0$ 时, $\Gamma > 0$, 发生正吸附, 则有 $C_s > C_b$, 即溶质的表相浓度大于体相浓度, 溶质被吸附到界面。当 $d\sigma/dC > 0$ 时, 此时 $\Gamma < 0$, 发生负吸附, 则有 $C_s < C_b$, 即溶质的表相浓度小于体相浓度, 溶质被排斥离开界面到体相内部。

在钎焊过程中, 当液态钎料中加有表面活性物质时, 虽然其添加量很少, 但都会发生强烈的正吸附作用, 使表面张力明显降低, 母材的润湿性得到改善。如在纯铜钎料中加微量 (质量分数为 0.04% ~ 0.08%) 的磷, 就可大大提高铜钎料在钢上的润湿性; 在锡基钎料中加质量分数为 0.1% 的镍, 也可改善钎料对铜的润湿性。通过添加表面活性物质来改善钎料润湿性, 具有重要意义。

1.5 液态钎料与母材的相互作用

在钎焊过程中, 液态钎料在固体母材表面润湿、铺展的同时就与母材发生相互作用。这种相互作用的驱动力是由钎料与母材间的浓度梯度所引起的原子扩散。可以将这种作用分为两类: 一是母材向液态钎料的溶解; 二是钎料组分向母材的扩散。这些相互作用的结果对钎焊接头的性能产生很大的影响, 有必要研究它们的规律性。

1.5.1 母材向液态钎料的溶解

通常, 当液态金属和固体金属接触时, 固体金属是否向液态金属溶解取决于两相原子间的相互作用力 (或作用能)。当异相原子间的作用力大于同相原子之间的作用力时, 固相金属原子就会离开固相表面, 进入液相, 造成固体金属的溶解。如果溶解的固相金属和液态金属为有限固溶体, 当溶解原子达到或超过饱和溶解度时, 就会形成金属间化合物。

钎焊时固态母材在液态钎料中的溶解过程是一个多相反应过程, 它经历两个阶段。第一阶段是母材与钎料接触的表面层的溶解, 这个反应发生在固-液两相界面上。其实质是液态金属对固体金属的润湿和原子在相界面处的交换, 破坏固体金属晶格内原子的结合, 使得液态金属原子与固体金属表面处的原子之间形成新的键, 从而完成溶解过程的第一阶段。但也有人认为: 液态金属与固体金属接触时, 液体的组分首先向固体表面扩散, 在厚度约为 0.1nm 的表面层内 (液相稳定形核尺寸) 达到饱和溶解度, 此时固体表面层不需要消耗能量即可向液相溶解。溶解的第二阶段是界面处被溶解的金属原子离开界面向液相内部迁移的过程。溶解的母材金属原子的这种迁移是依靠扩散或对流来实现的。对流可使液体内部的成分均匀化。由于在边界层内溶解原子的浓度梯度很大, 引起溶解原子迁移的主要因素还是扩散 (在自然对流的情况下)。

为了求解固体金属 A (为溶质组元) 向液态金属 B (为溶剂组元) 溶解时的溶解速度关系, 可作如下假设:

1) 固-液相界面处紧邻母材界面的一层液态钎料处于静止状态 (即扩散边界层静止) (图 3-1-14), 其厚度为 δ 。

2) 在边界层内的扩散为稳态扩散, 即 A 组元的浓度只随距离变化, 而与时间无关。

3) 扩散边界层以外 A 组元在 B 组元中的扩散充分, 即各处浓度一样。

根据 Fick 第一定律, 可得

$$j_A = -D_A \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_s = -D_A \frac{C_s - C}{\delta} \quad (3-1-58)$$

式中 j_A ——溶解通量, 在温度为 T 时, 单位时间内, 单位面积的 A 组元的溶解量, 单位为 mol/

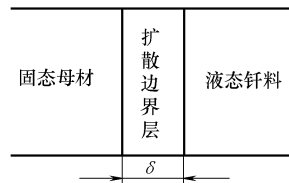


图 3-1-14 扩散边界层示意图

$(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

D_A ——组元 A 在扩散边界层中的扩散系数, 单位为 m^2/s ;

C_s ——在温度为 T 时, 组元 A 在液相组元 B 中的溶解度, 单位为 kg/m^3 或 mol/m^3 ;

C ——在时间为 t 时, 组元 A 在组元 B 中的浓度, 单位为 mol/L 。

δ ——扩散边界层的厚度, 单位为 m 。

而 A 组元在液态 B 组元中的溶解通量可写为

$$j_A = \frac{V}{S} \frac{dC}{dt} \quad (3-1-59)$$

式中 V ——液态组元 B 的体积, 单位为 m^3 ;

S ——固-液相接触面积, 单位为 m^2 。

根据 Nermst 给出的溶解速度常数的定义

$$K = \frac{K_s D_A / \delta}{K_s + D_A / \delta} \quad (3-1-60)$$

式中 K_s ——界面反应速度常数

联立以上三个方程可得

$$\frac{dC}{dt} = K \frac{S}{V} (C_s - C) \quad (3-1-61)$$

在初始条件 $t = 0$ 时, $c = 0$, 对上式积分得

$$C = C_s \left[1 - \exp \left(-K \frac{S}{V} t \right) \right] \quad (3-1-62)$$

或

$$\ln \frac{C_s}{C_s - C} = K \frac{S}{V} t \quad (3-1-63)$$

当组元 A 在液相组元 B 中的初始浓度为 C_0 时, 式 (3-1-63) 为

$$C = (C_s - C_0) \left[1 - \exp \left(-K \frac{S}{V} t \right) \right] \quad (3-1-64)$$

或

$$\ln \frac{C_s - C_0}{C_s - C} = K \frac{S}{V} t \quad (3-1-65)$$

从溶解速度常数的表达式 (3-1-59) 可知, 其量值由扩散系数和界面反应速度常数控制。可以认为: 表面的溶解过程涉及的表面反应过程和扩散过程是串行过程。也就是说, 当两个过程的速度相差悬殊时, 整个过程进行的速度取决于较慢过程的速度, 那么引起较慢过程的因素就称为控制要素。因此, 在极端情况下, 对上述溶解过程可分为以下两种情况, 一是扩散控制的溶解过程, 二是反应过程控制的溶解过程。

当扩散控制为控制要素时, 即当 $D_A / \delta \leq K_s$ 时, 式 (3-1-60) 可简化为

$$K = \frac{K_s D_A / \delta}{K_s + D_A / \delta} \approx \frac{D_A}{\delta} \quad (3-1-66)$$

即整个溶解过程的速度常数等于扩散速度常数, 此时的溶解过程规律表现为扩散规律, 溶解速度和时间的关系表现为抛物线关系。

当表面反应为控制要素时, 即当钎料组元向母材扩散 $D_A / \delta \geq K_s$ 时, 式 (3-1-60) 简化为

$$K = \frac{K_s D_A / \delta}{K_s + D_A / \delta} \approx K_s \quad (3-1-67)$$

即整个溶解过程的速度常数等于表面反应速度常数, 此时整个过程表现为表面反应的规律, 溶解速度和时间的关系满足线性关系。

下面根据溶解速度方程, 讨论各因素对溶解速度的影响。

1. 溶解度对溶解速度的影响

在母材-钎料所组成的体系中,最大溶解量与其构成的相图密切相关。如果二者所构成的相图在固-液状态下均无互溶的话,就不会发生溶解(如Fe-Ag系),反之则有溶解现象发生。

(1) 母材与钎料固态下无互溶和液态下完全互溶 若母材A与钎料B构成图3-1-15所示的简单共晶相图,即二者在固态下无互溶,在液态下完全互溶。当在钎焊温度为 T 时,A在B中的最大溶解量取决于A在B中的极限溶解度(线段 L)。极限溶解度越大(L 线段越长),共晶点 E 越靠近母材A,则 DE 线的斜率就越大,母材A的溶解量就越大。如果所用的钎料为AB的共晶合金(如用Al-Si钎料钎焊铝合金),则A在B中的溶解量就取决于 $(L-L_E)$ 的长度。若共晶点 E 越靠近母材A,则 $(L-L_E)$ 就越短,A的溶解量就越少。

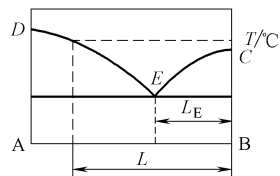


图 3-1-15 A 组元和 B 组元形成的简单共晶相图

(2) 母材和钎料在固态局部互溶和在液态完全互溶 如果金属 A 和金属 B 在液态下完全互溶,并且在固态下局部互溶(图 3-1-16),则最大溶解量就要不仅受到 A 在 B 中极限溶解度的影响,而且还受到 B 在 A 中的极限固溶度的影响。在温度为 T 时,在母材 A 溶解之前,先需要钎料 B 向母材 A 中扩散,使界面处的母材成分达到 a 点时,才发生溶解,并且母材 A 进入钎料 B 使钎料的成分达到 b 点时便停止溶解。因此,如果钎料 B 在母材 A 中的极限固溶度越大(即 a 点向右移动),则母材开始发生溶解所需的时间越长,给定时间内的溶解量就越少。而母材 A 在钎料 B 中的极限溶解度越大(b 点向右移动),则钎料成分达到饱和和所需的时间就越短,消耗的母材的量越多,溶解量就越大。

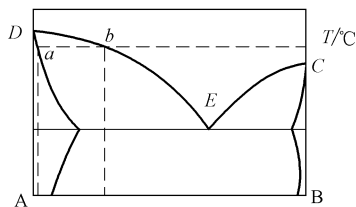


图 3-1-16 固态下局部互溶的共晶类型相图

一般来说,如果 A 在 B 中的极限溶解度 C_{AB} 和 B 在 A 中的极限固溶度 C_{BA} 之差越大,其溶解度就越大(即 ab 间隔大时溶解量大),反之则小。

2. 加热温度和保温时间的影响

钎焊温度增加的影响可从两方面考虑。首先温度增加,扩散系数 D 和界面反应速度常数 K_s 增加,致使溶解速度常数 K 增加,从而引起溶解速度的增加,溶解量增加。一般母材原子在刚开始溶解时,溶解速度较大,但随着时间的延长,界面扩散层中溶质原子渐渐饱和,溶解速度降低。当液态钎料被母材溶质原子饱和后,溶解过程停止。其次温度增加,母材在钎料中的溶解度也增加,因而溶解量也增加。例如,温度从 400°C 升高到 500°C ,铝在锌中溶解的质量分数从14%增为26%,因而溶解量也增加。

一般来说,溶解速度常数与温度的关系符合阿累尼乌斯(Arrhenius)公式,即

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3-1-68)$$

式中 K ——溶解速度常数;

E ——溶解激活能,单位为 J/mol ;

K_0 ——振动频率因子。

由于 E 和 K_0 仅与物性有关,而与温度无关,对式(3-1-68)取对数得

$$\ln K = \ln K_0 - \left(\frac{E}{R}\right) \frac{1}{T} \quad (3-1-69)$$

从式(3-1-69)可以看出,溶解速度常数的对数和温度的倒数基本上呈线性关系,温度越高, K 值越大,溶解速度越大。由式(3-1-69),通过测量不同温度下的溶解速度常数,就可以求出溶

解激活能。激活能表征母材 A 溶解进入钎料 B 的难易程度, 激活能越大, 溶解速度越小, 反之亦然。

在实际钎焊过程中, 保温时间对溶解速度的影响, 可认为是在钎料 B 中对溶解母材 A 原子的扩散速度的影响。扩散深度 x 与时间的关系为

$$x = \sqrt{2D_A t} \quad (3-1-70)$$

母材金属 A 在液态钎料 B 中的扩散是比较快的, 其扩散系数约为 $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 数量级, 而它们在固体中的扩散系数为 $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ 数量级。所以母材原子在液态钎料中的扩散速度比钎料组元原子向母材的扩散速度大得多。在液态钎料量很多的情况下, 钎焊时间增长, 母材的溶解量增多。在熔化的钎料中浸渍钎焊时, 由于上述原因, 容易发生溶蚀现象。在毛细钎焊时, 钎缝内的钎料量很少, 母材的溶解很快就达到饱和状态。时间再增长, 溶解量不再增多。但钎缝钎角处, 由于钎料较多, 保温时间增加时溶解量将增多, 因此, 容易在钎角处产生溶蚀。

1.5.2 钎料组元向母材的扩散

所谓扩散是一种原子的传输过程, 其驱动力为化学位梯度。在钎焊过程中, 由于母材和钎料的成分不同 (存在浓度梯度), 在温度的作用下, 必然导致原子的扩散。原子的这种热运动造成物质的宏观流动, 导致钎焊接头的组织不均匀, 从而引起力学性能的不均匀。钎焊时原子的扩散, 不仅有原子在固体金属中的扩散, 而且还有在液态金属中的扩散。因此, 研究钎焊过程中原子的扩散过程, 是非常重要的。

根据 Fick 第一定律, 钎焊时钎料向母材中的扩散量为

$$d_m = -DS \frac{dc}{dx} dt \quad (3-1-71)$$

式中 d_m ——钎料组分的扩散量, 单位为 mol;

D ——扩散系数, 单位为 cm^2/s ;

S ——扩散面积, 单位为 cm^2 ;

dc/dx ——在扩散方向上扩散组分的浓度梯度, 单位为 $\text{mol}/\text{L} \cdot \text{m}$;

dt ——扩散时间, 单位为 s。

由式 (3-1-71) 可见, 扩散数量与浓度梯度、扩散系数、扩散面积和扩散时间有关。扩散一般均为自高浓度向低浓度方向进行, 当钎料中某组元的含量比母材高时, 由于存在浓度梯度, 就会发生该组元向母材的扩散。浓度梯度越大, 扩散量将越多。扩散系数越大, 扩散量也越多。扩散系数和温度的关系满足 Arrhenius 公式, 因此有

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3-1-72)$$

式中 D_0 ——扩散常数, 主要取决于晶体点阵类型;

R ——气体常数, 单位为 $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

T ——热力学温度, 单位为 K;

Q ——扩散激活能, 单位为 J/mol 。

对式 (3-1-72) 两边取对数得

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{Q}{RT} \quad (3-1-73)$$

从式 (3-1-73) 可知, 扩散系数的对数和温度的倒数呈线性关系, 温度越高, 扩散系数越大。表 3-1-4 列举了一些钎料合金组元在母材基体中的扩散系数。激活能 Q 表征线性关系的斜率, Q 和 D_0 的取值涉及晶体结构。因此可以说, 扩散系数和晶体结构有关。晶体点阵越致密、扩散原子半

径越大，扩散系数越小。表 3-1-5 列举了几种元素 285℃时在铅中的扩散系数。第三元素的存在对元素的扩散会产生较大的影响，如第三元素对扩散原子的亲和力大于对母材金属原子的亲和力，则扩散系数减小；反之，扩散系数增加。

表 3-1-4 一些钎料合金组元在母材基体中的扩散系数

基本元素	扩散元素	温度/℃	扩散系数/(cm^2/s)
Fe	B	950	2.6×10^{-7}
	Ni	1200	9.3×10^{-11}
	Si	1150	1.45×10^{-8}
	W	1280	2.4×10^{-9}
	Sn	1000	2.0×10^{-9}
Cu	Mn	850	1.3×10^{-10}
	Ni	950	2.1×10^{-10}
	Pb	860	1.3×10^{-10}
	Zn	880	5.6×10^{-10}
Ni	Cu	890	$(1.9 \sim 2.4) \times 10^{-10}$
Al	Cu	497	2.52×10^{-10}
	Si	500	9.85×10^{-10}
	Zn	507	2.04×10^{-10}

表 3-1-5 几种元素 285℃时在铅中的扩散系数

扩散元素	原子半径/($\times 10^{-10}\text{m}$)	扩散系数/(cm^2/s)
Ag	1.44	9.1×10^{-8}
Cd	1.52	2.0×10^{-9}
Sb	1.61	6.4×10^{-10}
Sn	1.68	1.6×10^{-10}

用 Al-28Cu-6Si 钎料钎焊铝合金时，可发现钎料组分元素向母材铝的扩散，如图 3-1-17 所示。在钎焊接头靠近交界面的母材边上，形成了一条与钎缝平行的明亮带，它是钎焊时液态钎料中的硅和铜向铝扩散，而形成的固溶体。用纯 Cu 钎焊钢时，同样可发现液态 Cu 向钢中扩散的情况。图 3-1-18 是 1100℃铜钎焊钢时铜在钢中的分布。随着保温时间的延长，不但 Cu 的扩散深度增加，扩散层的 Cu 含量也增加。

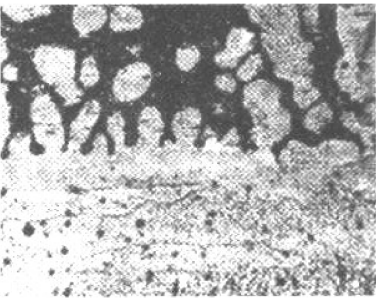


图 3-1-17 Al-28Cu-6Si 钎料钎焊铝合金时的显微组织

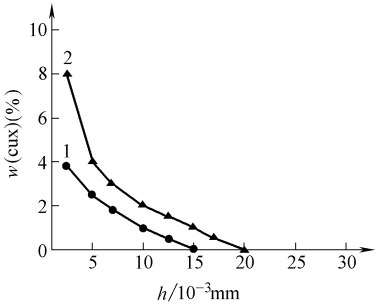


图 3-1-18 铜钎焊钢时铜在钢中的分布
1—保温 1min 2—保温 60min

钎焊时还有一个钎料组元原子扩散的现象，即晶间渗入，它是由原子的晶间扩散引起的。晶间渗入产生的条件是在钎料中某组元和母材所构成的相图中有低熔点共晶产生，其产生原因可解释为：在液态钎料与母材接触的过程中，钎料组分要向母材扩散，由于晶界处原子的排列和晶内相比存在较大的错配，空隙较多，原子扩散速度加快，晶界扩散速度大大快于晶内扩散速度，晶界处扩散组元的浓度大大提高，结果在晶界处形成钎料组分与母材金属的低熔点共晶。由于其熔点低于钎

焊温度，这样就在晶界处形成一层液态层。钎料组元向母材的晶间渗入，往往使钎焊接头的强度、塑性等力学性能变坏。尤其在钎焊薄件时，晶间渗入可能穿透整个焊件厚度，使接头变脆。

根据史密斯（Smith）提出的理论，液态金属要渗入到多晶体固态金属晶界中去，就必须满足以下条件：

$$\sigma_{GB} \geq 2\sigma_{LS} \quad (3-1-74)$$

式中 σ_{GB} ——多晶体的界面能，也称界面张力，单位为 N/m；

σ_{LS} ——液态金属与固态金属间的界面能，也称液-固界面张力，单位为 N/m。

根据 Smith 的理论，多晶体内液相与固相平衡时（图 3-1-19），可得

$$\sigma_{GB} = 2\sigma_{LS} \cos \frac{\theta}{2} \quad (3-1-75)$$

或

$$\cos \frac{\theta}{2} = \frac{\sigma_{GB}}{2\sigma_{LS}} \quad (3-1-76)$$

式中 θ ——二面角。

从式 (3-1-76) 可知，当 $\sigma_{LS} \geq \sigma_{GB}/2$ 时， $\cos(\theta/2) \leq 1$ ，随着界面能之比 (σ_{GB}/σ_{LS}) 的增大， θ 在 $180^\circ \sim 0^\circ$ 转化。当 $\theta \leq 90^\circ$ 时，可以认为液态金属能渗入固态金属晶界而产生晶间渗入，即在满足 $\sigma_{LS} \geq \sigma_{GB}/2$ 时，晶界表面能尽可能地大，固-液界面能尽可能地小。

在液态钎料向母材晶间扩散渗入的同时，母材晶界上的某些元素，或者从晶内向晶界扩散的某些元素会加剧晶间渗入过程。例如，Cu 钎焊钢时，Cu 的晶间渗入随着钢的 C 含量的增加而加剧。这是因为 Cu 向碳钢晶界渗入的同时，形成了 Fe-Cu-C 三元共晶，从而在晶界出现了更多的液相所致。另一方面晶界上共晶相的形成和钎料组分在母材中的溶解度有关。因为钎料组分向母材晶间扩散时先形成固溶体，只有达到它在母材中的饱和溶解度后才会形成共晶相。因此，钎料组分在母材中的溶解度越大，晶间渗入的可能性越小。

在实际钎焊过程中，当用含硼的镍基钎料钎焊碳钢、不锈钢和高温合金时，就可以观察到晶间渗入现象，如图 3-1-20 所示。

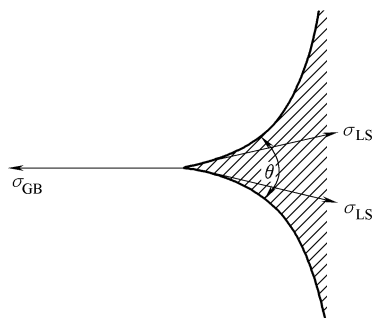


图 3-1-19 产生晶间渗入时的界面张力平衡图

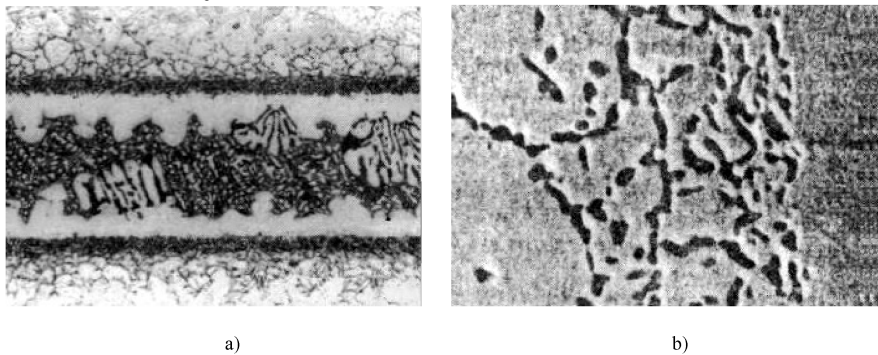


图 3-1-20 含硼镍基钎料钎焊不锈钢时的晶间渗入
a) 钎缝区形貌 b) 硼向母材扩散情况

1.5.3 钎焊接头组织的不均匀性

一般来说,钎料和母材在组成上存在较大差异。钎焊时,由于液态钎料和固体母材之间的相互作用,不但使钎缝成分与钎料原有的成分不同,而且使钎缝的组织也与钎料的原始组织产生差异。钎缝的成分和组织在整个接头区内是不均匀的。一般可以把钎焊接头分为三个区域(图3-1-21),即母材上靠近界面的扩散区、钎缝界面区和钎缝中心区。扩散区是由钎料组分向母材中扩散所形成的。钎缝界面区是加热时母材向液态钎料溶解、反应,冷却时凝固结晶形成的,它可能是固溶体,也可能是金属间化合物。钎缝中心区由于母材的溶解和钎料组分的扩散以及结晶时的偏析,其组织也不同于钎料的原始组织。钎缝间隙较大时,该区组织同钎料原始组织较接近,间隙小时,二者差别可能极大。例如用镍基钎料(Ni-Cr-B-Si)钎焊不锈钢时,一般当钎缝间隙小于 $30\mu\text{m}$ 时,由于钎料中硼、硅原子向母材的扩散,使钎缝中的组织由含有大量金属间化合物的包晶组织转变为Ni-Cr固溶体,完全不同于钎料的原始组织,如图3-1-22所示。

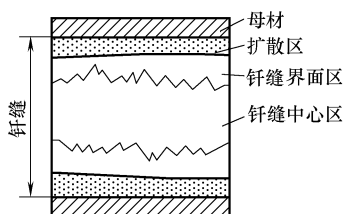


图 3-1-21 钎缝区组织示意图

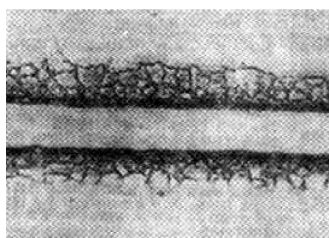


图 3-1-22 Ni-Cr-B-Si 钎料钎焊小间隙钎缝时的显微组织

大量的试验结果表明,影响钎焊接头性能的区域主要在界面区。而且界面区的组织、形貌既不同于母材扩散区,也不同于钎缝中心区,并且根据不同的钎料-母材组合,可以得到不同的界面区组织。因此,研究钎缝界面区的组织及形貌,是钎焊技术研究的重点内容。

钎焊过程实际上就是加热母材和钎料,当温度高于钎料熔点时,钎料熔化润湿母材、在母材上铺展或在母材间隙内毛细填缝。在保温一段时间后,冷却凝固形成钎缝。要注意的是液态钎料在润湿过程中,母材就和钎料发生了相互作用(即溶解、反应),特别是在界面区形成金属间化合物的母材-钎料组合,随后的保温过程加剧了金属间化合物的生长。对界面区形成固溶体的母材-钎料组合,在保温期间,有可能已经形成固溶体,有可能还没有形成,界面区的组织是在随后的冷却凝固后形成。而对于接触反应钎焊,完全是通过原子的扩散得到液态的共晶组织,因此接触反应钎焊的钎缝组织,凝固后基本上是完全的共晶组织。从上面的分析可知,钎缝界面区组织的形成时序是不同的,钎缝界面区的组织结构主要有固溶体、金属间化合物和共晶体。

1. 固溶体型界面区组织

结晶系相同(晶格类型相同),原子半径相近的元素间大多可以任意比例固溶。这类金属间的界面成分从一侧到另一侧连续变化。这样晶系的元素作为母材-钎料组合时,在界面区得到固溶体组织。当钎料与母材为同基的合金时,在界面区也常常形成固溶体组织。例如,采用Al-Si共晶钎料钎焊铝合金时,钎料本身虽然是共晶体,但界面区却得到固溶体组织。这是因为在钎焊过程中发生铝的溶解,使与母材接触的钎料层中的铝质量分数增加。在 600°C 时,铝的质量分数可达90%左右,冷却凝固时,首先从母材表面处开始结晶,而最先结晶出来的是 $\alpha\text{-Al}$ 固溶体,最后才是共晶体。因此,可以看出界面处为一层参差不齐的向钎料方向生长的硅在铝中的固溶体组织。在钎缝中心区则保留着原始钎料的共晶组织,如图3-1-23所示。当用黄铜钎料钎焊铜母材时,还可以看到黄铜晶粒在铜晶粒的基础上连续生长,形成共同晶粒的现象,如图3-1-24所示。



图 3-1-23 Al-Si 共晶钎料钎焊铝合金的显微组织



图 3-1-24 黄铜钎料钎焊铜时的显微组织

在某些情况下,即使母材和钎料不同基,钎料本身也不是单相组织,钎缝界面区也会出现固溶体。例如用镍基钎料钎焊奥氏体不锈钢,在钎缝间隙相当小的情况下,钎缝和母材完全形成共同晶粒。出现这种组织的原因是:奥氏体不锈钢虽是铁基,钎料属镍基,但奥氏体不锈钢和镍均属面心立方晶格,它们的晶格常数又非常接近,凝固时钎料在母材边界上非均匀形核形成固溶体共同晶粒。其次镍基钎料本身虽是多相组织(固溶体+金属间化合物),但在钎焊过程中钎缝中的硼、硅向母材扩散,其浓度下降到极限浓度以下,凝固后得到单一的镍-铬固溶体(图 3-1-22)。

一般来说,在相图上钎料与母材能形成固溶体,钎焊后界面区即可能出现固溶体。固溶体组织一般具有良好的力学性能,对接头性能是有利的。

2. 金属间化合物类界面区组织

通常,在选择钎料-母材组合时,一般都希望钎缝界面区组织为固溶体(如 Al-Si 钎料钎焊铝合金、Cu-P 钎料和银钎料钎焊铜及合金等),这时钎焊接头具有较好的力学性能(不那么脆)。但在大多数情况下,不可避免地要选择钎料-母材组合或它们中的某组元组合存在较大的亲和力,在界面区形成金属间化合物的情况(如 Sn 基、Zn-Al 基钎料钎焊铜、Al-Si 基、Cu-P 基钎料钎焊奥氏体不锈钢等)。

钎焊时母材 A 和钎料 B 可能形成化合物的典型相图,如图 3-1-25 所示。化合物形成的过程是:在温度为 T 时以钎料 B 钎焊母材 A, A 迅速向 B 中溶解,界面区浓度可达到 C ,冷却凝固时,首先在界面处析出金属间化合物,而后才在 e 点发生共晶反应得到共晶组织($\alpha + A_mB_n$)。如 A-B 体系存在几种化合物,同时母材向钎料中的溶解使得界面区生成含母材较少的一种化合物后仍未达到该温度下的平衡状态,则 A 和 B 之间将继续扩散,冷却凝固后就有可能出现第二种化合物。如用锡钎焊铜,在钎料边为 η -Cu₆Sn₅,在母材边为 ε -Cu₃Sn,如图 3-1-26 所示。除了上述的扩散作用之外,界面区的化合物也会直接由母材和钎料发生化学反应而形成。

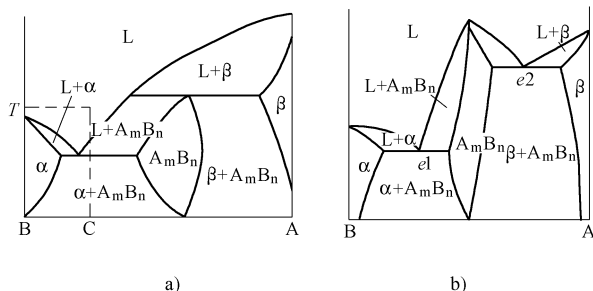


图 3-1-25 形成化合物的二元合金相图

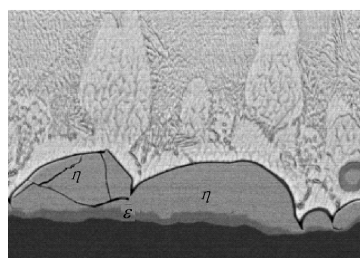


图 3-1-26 锡钎焊铜时界面金属间化合物形貌

以上是纯金属母材与纯金属钎料钎焊时的情形。在使用合金钎料时,情况要复杂得多。从现有的资料看,用合金钎料进行钎焊时,钎料组分能否与母材金属形成金属间化合物,除了取决于该组分与母材的相图外,还取决于它与母材金属和钎料其他组元金属之间的亲和力对比以及其在钎料中

的浓度。例如,用 Ag-Si、Ag-Sn、Ag-Zn 合金作为钎料来钎焊低碳钢时,考察 Si、Sn 和 Zn 与 Fe 形成金属间化合物的情况。选用上述钎料的原因是:钎料的基体 Ag 与 Fe 互不作用,因而对所研究的过程不起附加影响。Fe 和 Ag 与 Si、Sn、Zn 之间的亲和力大小顺序为

$$F_{\text{Fe-Si}} > F_{\text{Fe-Sn}} > F_{\text{Fe-Zn}}, F_{\text{Ag-Zn}} > F_{\text{Ag-Si}} > F_{\text{Ag-Sn}}$$

试验结果表明:当 $w(\text{Si}) > 1\%$ 时,在接头中就会出现化合物相,接头抗拉强度极低。当 $w(\text{Zn}) < 50\%$ 时,接头中不会出现化合物相,这是含 Zn 的 Ag 钎料广泛用于钎焊低碳钢的原因。当 $w(\text{Sn}) < 14.5\%$ 时,接头中不会出现化合物相,而当 $w(\text{Sn}) > 26\%$ 时,接头中就会出现化合物相。由此可见,在使用合金钎料的情况下,如果某组元可与母材形成化合物,而它与母材的亲和力又显著大于其对钎料其他组元的亲和力,则在该组元浓度很小的情况下就会出现化合物层,如 Ag-Si 钎料钎焊低碳钢的情形。如果该组分与钎料基体金属的亲和力比与母材的亲和力大得多,则即使其浓度很高时,也不易产生化合物层,就像 Ag-Zn 钎料钎焊低碳钢的情况。如果这两个亲和力相近,则其在钎料中的浓度高于某一值后就将形成化合物层,而低于某一值就不会形成化合物层,就如 Ag-Sn 钎料钎焊低碳钢的情况。

为了减缓界面区化合物相的生成,可采用如下措施:

1) 在钎料中加入不与母材和钎料基体金属形成化合物的组元,以降低参与反应组元的浓度。如在 Sn 中加入 Pb,用 Sn-Pb 钎料钎焊 Cu 时,可以使 Cu_6Sn_5 层减薄,当 Pb 的质量分数达到 70% 时,化合物层甚至完全消失。

2) 在钎料中加入只能与钎料基体金属形成化合物而不与母材形成化合物的组元。例如,在 Sn 中加入 Ag 钎焊 Cu 时,可在钎缝中形成 Ag_3Sn 金属间化合物,从而使 Cu_6Sn_5 层减薄。

目前对钎焊时钎缝中金属间化合物形成的规律研究得还很不够,而金属间化合物的形成对钎缝的性能将产生很大的影响。随着近年人们对无铅钎焊技术的研究的逐步深入,特别是对无铅钎料的界面反应的深入研究,人们对界面金属间化合物形成机理、对钎缝力学性能的影响等一系列问题有了较为深刻的理解。

3. 共晶体类界面区组织

大多数情况下,我们在讨论共晶体类界面区组织时,其实是整个钎缝都是共晶体组织。无论采用共晶体的钎料(一般都希望钎料是共晶的二元或多元合金,如 Cu-P、Al-Si、Sn-Ag 基钎料均为共晶钎料),还是通过接触反应钎焊的方法来连接金属(母材和钎料能形成共晶反应)。这里主要讨论接触反应钎焊的情况。

对于母材和钎料可以形成共晶体的合金体系,当加热温度在高于该体系的共晶温度,低于母材和钎料的熔化温度的温度范围保温时,由于各组元的相互扩散,在界面处形成液态共晶体,从而达到连接的目的。这样的方法称为接触反应钎焊。例如,Ag-Cu 二元系(相图见图 3-1-8),共晶点的成分为 $w(\text{Cu}) = 28\%$,共晶温度为 779°C ,银和铜的熔点分别为 960°C 、 1083°C ,因此,可用银来扩散钎焊铜。将银箔置于两铜件之间,稍加压力使之良好接触,加热到 800°C 左右的温度,保温一定时间,就可通过形成的液态共晶将两铜件连接起来,钎缝显微组织如图 3-1-27 所示。又如在 Al-Cu 系中,有温度为 548°C 、 $w(\text{Cu}) = 33\%$ 的共晶点,若使铝和铜紧密接触,加热到高于 548°C ,在界面上也会形成 Al-CuAl_2 共晶,把铝和铜连接起来。

共晶层的形成速度和钎料与母材的互溶度有关。互溶度越大,共晶层的形成速度越慢,当母材和钎料在固态下互不溶解时,形成共晶层的速度就快,这是因为在母材与钎料间的扩散先形成固溶体,只有达到饱和溶解度以后才形成共晶体的缘故。原则上凡是能形成共晶的金属,均适于接触反应钎焊,表 3-1-6 列出了一

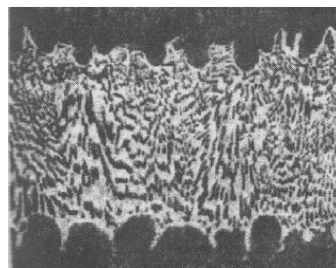


图 3-1-27 银接触钎焊铜时钎缝显微组织

些在加热时会发生接触共晶反应的金属偶。

表 3-1-6 可用于接触反应钎焊的金属偶

A	B	共晶成分/(质量分数,%)	共晶点/℃	A	B	共晶成分(质量分数,%)	共晶点/℃
Ag	Al	29.5	556	Ge	Ni	33.2	775
Ag	Be	0.97	881	Mn	Ni	39.5	1018
Ag	Cu	71.9	779	Mn	Ti	43.5	1175
Ag	Ge	19	651	Nb	Ni	51.6	1175
Ag	Si	4.5	830	Ni	Pd	60	1237
Al	La	76	518	Ni	Si	29	964
Al	Cu	33	548	Ni	Zr	17	961
Al	Ge	53.5	424	Ni	Ti	13	955
Al	Mg	67.7	437	Au	Si	~6	370
Al	Si	11.7	577	Au	Ni	~25	950
Al	Zn	95	382	Au	Cu	56.5	889
Au	Ge	12	357	Co	Ti	72	1025
Au	Sb	25	360	Co	Zr	12	1460
Cu	Ti	28	880	Cu	Ge	40	640
Cu	Zr	46	885	Cu	Mn	35	870
Fe	Ti	68	1085				

4. 其他类型的界面区结合

如果两种金属之间既无互溶，又无扩散，则理论上它们之间就难以结合。但确实存在有的金属偶以附着方式实现连接的现象。例如，铁和铋在固态和液态下都难以形成合金，但它们却可以钎焊在一起。图 3-1-28 和图 3-1-29 为 Bi-Fe 相图及结合区显微组织，在这类结合区看不到过渡层。有人认为这是范德华（Van der Waals）力作用的结果；也有人认为是液态的铋沿铁的晶界渗透，凝固后形成镶嵌式的机械连接。

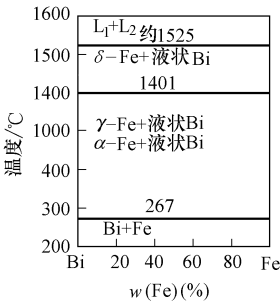


图 3-1-28 Bi-Fe 二元合金相图

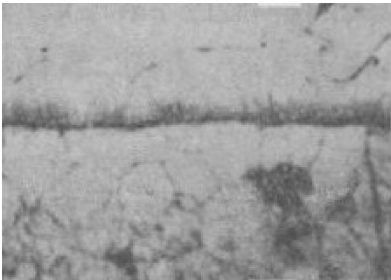


图 3-1-29 Bi-Fe 界面区显微形貌

又如无铅高温钎料 Bi-Ag 2.5%（质量分数）钎焊铜（相图见图 3-1-30），在固态下它们完全不固溶，在共晶温度时铜在铋中溶解的质量分数为 0.5%，但它们不形成新相。从图 3-1-31 可以清楚地看见在铜晶界处的晶界渗入，铋的晶界渗入导致铜晶界的溶解，形成沟槽，得到较高强度的钎焊接头。

总之，钎焊接头界面区的组织变化由于固态母材和液态钎料之间的溶解、扩散、反应和凝固结晶等一系列金属学过程的影响而显得异常复杂，这也是钎焊领域的研究重点。

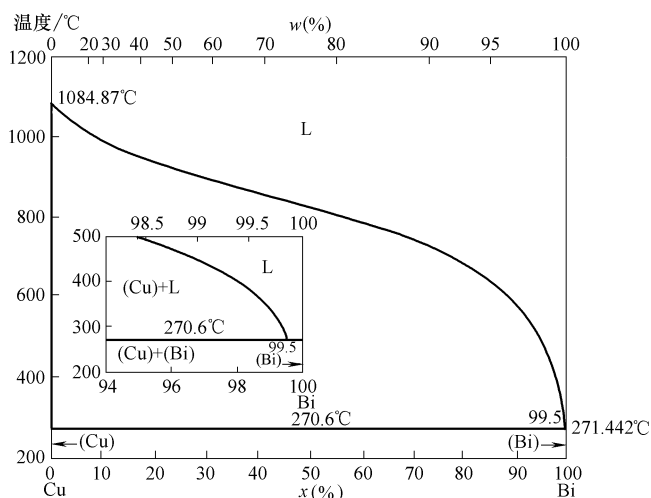


图 3-1-30 Cu-Bi 二元合金相图



图 3-1-31 铋溶蚀铜晶界形成的机械连接

参考文献

- [1] 邹僖. 钎焊 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [2] 方洪渊, 冯吉才. 材料连接过程中的界面行为 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [3] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [4] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册. 第 1 卷焊接方法及设备 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [5] 美国金属学会. 金属手册: 第 6 卷 [M] 9 版. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [6] 美国焊接学会. 钎焊手册 [M]. 曹雄夫, 译. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [7] 美国焊接学会. 软钎焊手册 [M]. 崔殿亨, 译. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [8] 赵越. 钎焊技术及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [9] 方洪渊. 简明钎焊工手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [10] American Welding Society. Brazing Handbook [M]. Fifth Edition. Miami: American Welding Society, 1991.
- [11] Vianco. P. T. Soldering Handbook [M]. 3rd Edition. Miami: American Welding Society, 2000.
- [12] Jacobson D M. Humpston G. Principles of Brazing [M]. Ohio: ASM International, 2005.
- [13] Humpston G. Jacobson D M. Principles of Soldering [M]. Ohio: ASM International, 2004.
- [14] Manko. H. H. Solder and Soldering [M]. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [15] 任家烈, 吴爱萍. 先进材料的连接 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [16] 李志远, 钱乙余, 张九海. 先进连接方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [17] 何康生, 曹雄夫. 异种金属的连接 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [18] 印有胜. 钎焊手册 [M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1989.
- [19] 顾惕人, 朱步瑶, 李外郎等. 表面化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [20] 虞觉奇, 易文质, 陈邦迪等. 二元合金状态图集 [M]. 上海: 上海科学出版社, 1984.
- [21] 戴永年. 二元合金相图集 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [22] 长崎诚三, 平林真. 二元合金状态图集 [M]. 刘安生, 译. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [23] 饭田孝道, 罗格里克. 液态金属的物理性能 [M]. 冼爱平, 王连文, 译. 北京: 科学出版社, 2006.
- [24] 曹立礼. 材料表面科学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [25] 许并社. 材料界面的物理与化学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [26] Cazabat. A. How does a Droplet Spread [J]. Contemporary Physics, 1987, 28 (4): 347-364.

-
- [27] Goodrich. F. C. The Mathematical Theory of Capillarity [C]. Proceedings of the Royal Society, 1961, A260: 481-495.
- [28] Laurila T, Vuorinen V, Kivilahti J K. Interfacial reactions between lead-free solders and common base materials [J]. Materials Science and Engineering R, 2005, 49 (1-2): 1-60.
- [29] Song J M, Chuang H Y, Wu Z M. Interfacial Reactions between Bi-Ag High-Temperature Solders and Metallic Substrates [J]. Journal of Electronic Materials, 2006, 35 (5): 1041-1049.

第2章 钎焊方法

本章系统介绍了各种钎焊方法的基本原理、方法的适应范围以及选择钎焊方法要遵循的基本原则，对新的钎焊方法进行了简单的介绍，同时列举了一些典型的钎焊应用实例。

2.1 火焰钎焊

2.1.1 火焰钎焊的基本原理

火焰钎焊是一种常见的钎焊方法，完成钎料熔化和流动所需的热量是靠燃气火焰来实现的，如图3-2-1所示。它利用可燃气（乙炔、天然气、液化石油气、氢气和丙烷等）吹以空气或纯氧燃烧生成的火焰对工件和钎料进行加热，将要连接的工件表面温度均匀升高到钎焊温度，添加钎料熔化后，液态钎料在工件表面或间隙中润湿、铺展、毛细流动填缝、最终凝固结晶而实现钎焊连接。

火焰钎焊通用性强，工艺过程简单，主要用于铜基钎料和银基钎料钎焊碳钢、低合金钢、不锈钢、铜及铜合金的薄壁和小型焊件。火焰钎焊的特点如下：

- 1) 火焰钎焊在空气中完成，一般不需要保护气体，通常需要使用钎剂（具有自钎作用的材料可不用钎剂）。
- 2) 所用设备简单轻便，容易自制，操作容易，燃气来源广，不依赖电力供应。
- 3) 钎料的选择范围广，低温的银基钎料到高温的镍基和铜基钎料都可使用。
- 4) 火焰钎焊是一种方便灵活的钎焊工艺，少量的接头可以手工完成，大批量生产可以采用自动火焰钎焊系统。

在很多工业生产领域都需要应用火焰钎焊，如在加热器具、汽车、空调和制冷工业中利用火焰钎焊连接大量的管路接头，在硬质合金刀具行业利用火焰钎焊连接硬质合金刀片和碳钢刀杆等。

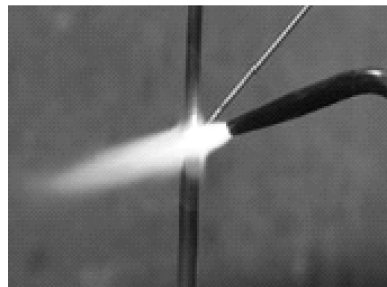


图3-2-1 火焰钎焊

2.1.2 火焰钎焊设备及工艺方法

1. 火焰钎焊的设备

火焰钎焊设备主要包括储气设备、阀门、传输气体的管路系统、焊炬、喷嘴、安全装置和其他辅助装置。

(1) 储气设备 手工火焰钎焊所用的燃气通常用以下三种方式储存和供气。

- 1) 单独气瓶供气，通常用于量不大或需要移动的场所。
- 2) 带歧管的瓶组供气，用于气体消耗量较大的场合。
- 3) 管道输送，用于需要大量气体的场合。

(2) 气体压力调节器 气体压力调节器的作用如下。

- 1) 降低从气源来的压力，以满足燃气燃烧的要求。
- 2) 当气源压力有变化时，维持出口压力不变。

压力调节器有单级和双级两种不同的类型。单级调节器是简易型的调节器，它使气瓶输出的气

体压力一步降到钎焊用压力。双级调节器使气瓶输出的气体压力分两步降到钎焊用压力。调压器上通常有两个量表,调压器的入口量表测量气瓶的气体压力,外侧量表测量释放到焊炬上的压力。

(3) 焊炬及喷嘴

1) 焊炬。手工火焰钎焊的焊炬由枪体、混合室和喷嘴组成,枪体上有阀门控制氧气和燃气的流出。混合室提供了适合燃烧的燃气和氧气的混合。喷嘴提供了所期望的火焰尺寸和轮廓,它能保证操作人员有效地将火焰引向被钎焊件。

2) 喷嘴。各种火焰钎焊的喷嘴根据焊炬尺寸、被加热的焊件尺寸和选择的燃气来确定。它们通常采用具有高导热性、不容易过热的铜合金来加工。乙炔或氢气使用的喷嘴口是平的,用于丙烷或液化石油气的喷嘴,在其口上有一个凹面,以防止侧向风吹灭火焰。

(4) 夹具及其他辅助装置

1) 夹具。夹具的设计主要考虑夹具不能干涉焊炬火焰的正常移动和接合面的均匀加热,并且保证钎焊操作者具有良好的视野来观察钎焊接头。夹具与焊件的接触面积越小越好,它不能被焊炬火焰退火、不能接触钎剂、不能起到散热器的作用。火焰钎焊夹具应能适应钎焊组件加热后的膨胀。

2) 其他辅助装置。它包括如下配件。

① 软管:使用在氧-燃气设备上的软管是柔性的,并能承受相对高的压力。

② 回火保险器:回火保险器安装在软管和焊炬之间或软管和调压器之间,它实际上是一个阀门,防止由于设备、操作人员误操作等原因使焊炬火焰进入焊炬或软管中形成回火。

2. 火焰钎焊的工艺方法

(1) 钎料 大多数金属适合火焰钎焊,只有一些活泼的金属(如钛和锆)不适合火焰钎焊。火焰钎焊中常用的钎料系统是 BAg、BCuP 和 RBCuZn。BAg 钎料的熔化温度为 593 ~ 815℃,它尽管比铜锌钎料贵,但由于其熔化温度低,具有优良的钎焊工艺性能,容易操作,所以可以用于生产速度较高的场合。BAg 钎料可用于大部分黑色金属和有色金属,一般需使用钎剂。

BCuP 钎料的熔化温度为 704 ~ 926℃,主要用于铜和铜合金的钎焊,不能用于黑色金属、镍基合金或含质量分数 10% 以上镍的铜合金。BCuP 钎料在纯铜上使用时是自钎剂,但在其他金属(包括铜合金)上使用时需使用钎剂。由于其耐蚀性差,不能用于含硫的工作环境中。

RBCuZn 钎料的熔化温度为 815 ~ 982℃,可用于连接各种钢铁材料和非钢铁材料。由于其钎焊温度较高,要防止母材过热。

(2) 钎剂 用于火焰钎焊的钎剂一般是氟化物-硼酸盐型。按照美国焊接学会(AWS)分类的钎剂和典型应用见表 3-2-1。

表 3-2-1 美国焊接学会(AWS)钎剂的分类及典型应用

AWS 钎剂的分类	典型应用
FB-3A	通用,使用在钎焊钢铁材料和非钢铁材料的低钎剂
FB-3C	用于高铬不锈钢、碳化钨、碳化铬和钼合金
FB-3D	使用温度在 870 ~ 1100℃
FB-3E	液体钎剂,具有有限的活性,用于贫气的炉中钎焊或在 625℃ 以上连接珠宝部件
FB-3F	干燥的粉状钎剂,使用温度 650 ~ 815℃
FB-3G	糊状钎剂,类似于 FB-3A
FB-3H	糊状钎剂,类似于 FB-3A
FB-4A	用于钎焊铝青铜和其他含有少量铝和钛的合金

利用钎剂的熔化温度比钎料的钎焊温度稍微低一点的特性可以指导焊工观察焊件是否接近钎焊温度,以避免工件过热。当观察到钎剂完全变成液体后,就将钎料接触到接头上,钎料随即熔化,连续送进钎料,直到流动的钎料填满接头,停止加热。

(3) 火焰 在火焰钎焊中,为了获得满意的钎焊接头,要对火焰进行适当调节。调节氧乙炔焰相对简单,依靠观察火焰的特点来调节。丙烷气和液化石油气的火焰没有明显的变化,调节比较困难,需要通过流量计来调节。

加热时,要用内焰而不是焰心来加热。钎料只在母材的钎焊区域达到适合的钎焊温度时才能实现流动和毛细现象,要通过焊件与火焰的相对运动,使接头区域达到均匀的温升。尽量不要把火焰直接作用在钎料上以及缝隙处的钎剂上,直接加热钎焊材料容易使它们过热、出现烟气,甚至导致钎焊材料失效。

(4) 焊炬摆动 摆动焊炬是火焰钎焊中最重要的操作要求之一。其目的是保证钎焊结合面上的温度能均匀地达到钎焊温度,并尽可能地在钎焊温度下维持一段时间,以完成钎料向接头缝隙的流入和气体的析出。也可以使用辅加多头或多火焰焊炬实现焊件温度的均匀化。

(5) 钎料、钎剂的填加 手工火焰钎焊操作中通常采用送进钎料的方式,而在机械化操作时采用预置的钎料或焊膏。预置钎料要避免过早地熔化。当通过手工将钎料丝送到接头上时,先将钎料丝头浸在钎剂中,然后用钎料将钎剂抹到接头上,控制热量使熔化的钎料贯穿接头流动。

(6) 钎焊接头的冷却

钎焊后,必须使接头在静止的状态下冷却到钎料的固相线温度以下,这种静态的空冷必须在没有振动和移动的条件下完成,以防损害接头。接头允许的冷却速度取决于母材的热膨胀系数和接头能够承受的热冲击。

2.1.3 火焰钎焊的应用实例

在空调器和制冷工业中通常采用火焰钎焊的方法连接大量的铜管接头。空调机管路系统所用的材料是纯铜或黄铜,具有气密性的要求。铜和铜合金具有较好的润湿性,主要的氧化膜容易清除,因此具有优良的钎焊性。火焰钎焊与其他焊接方法相比,具有成本低,劳动效率高,致密性好,操作简单等优点。基于以上因素,空调铜管连接常采用火焰钎焊技术。

空调管路系统使用的都是薄壁材料,厚度不超过 2.5mm,其中铜管接头采用对接接头,如图 3-2-2 所示,钎焊时接头处于垂直位置,钎料熔化后往下流入管缝内实现连接。

1. 钎料的选取

钎焊是通过毛细作用把熔化的钎料吸进接头之中的一种方法。所以液态钎料对固体母材的润湿性及流动性是得到良好接头的关键。铜磷钎料(以 Cu-P 二元合金为基的钎料)和铜银磷钎料(以 Cu-Ag-P 三元合金为基的钎料)因含磷,不但熔点得到适当地降低,而且具有自钎作用,钎焊时可少加或不加钎剂,且这类钎料的润湿性很好,接头具有很高的耐蚀性,适用性广。

试验证明,铜磷钎料和铜银磷钎料在空调管路系统纯铜管火焰钎焊中的使用能满足接头的性能及钎焊工艺要求。

2. 钎剂的选用

钎剂的作用是清除钎料和母材表面的氧化物、改善钎料对母材的润湿能力以及有效地保护焊件和液态钎料在钎焊过程中不被氧化。

以硼砂为主的硬钎剂在钎焊后会留有残渣,防氧化效果一般。使用以硼化物和醇类为主要成分的新型高效助焊剂,熔化温度低,可迅速在焊缝周围形成一种保护层,以减少有害气体侵入,防氧化效果显著,而且能使焊缝金属晶粒细化,以提高焊缝的耐蚀性。焊缝成形美观,焊后焊接区呈红色。

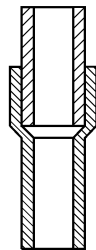


图 3-2-2 铜管接头对接接头形式

3. 焊前清理和接头装配

焊前清理是钎焊前十分重要的准备工作之一，必须将接口处清洗干净，去除油污或氧化物。

为保证接头的钎缝强度和致密性，焊接接头间必须留有适当的间隙。间隙太小，某些钎料不能流过。另外，铜管的飞边或不规则的边缘会影响钎料的流动或部件的装配间隙，所以通常配管前要注意对飞边进行清理。

不同母材、不同钎料所需的接头间隙不同。空调管路钎焊接头的间隙（单边）一般取 $0.05 \sim 0.1\text{mm}$ ，对直径较大的管（ $\phi 16\text{mm}$ 以上），间隙取 $\leq 0.15\text{mm}$ ；直径 $\phi 22\text{mm}$ 以上的管，间隙取 $\leq 0.2\text{mm}$ 。

4. 钎焊加热

用火焰的外焰先在粗管管端 10mm 范围内加热；再在小管距接口处 10mm 范围内加热，然后在接口处加热。

将工件接头上下两部分尽可能均匀地加热到钎焊温度（ $630 \sim 670^\circ\text{C}$ ），焰心距工件表面应保持 $15 \sim 20\text{mm}$ 的距离，并用滚动和扫动焊枪的方法保持温度。注意拿住钎料靠住焊枪火焰外层使之预热，达到钎焊温度后才开始加钎料（加入钎料时，必须从火焰加热方向的背面添加钎料），用铜管的热量使钎料熔化，通过毛细作用把钎料吸入整个接头中。不应当用火焰直接加热使钎料熔化。注意加热时要温度均匀，防止过烧。

待液态钎料填满间隙后，移开钎料丝，同时火焰焰心与焊件的距离应加大到 $35 \sim 45\text{mm}$ ，以防钎料过热或焊件过烧，从而使接头的性能变坏。

5. 充氮保护

因铜管表面易形成氧化皮，表面氧化皮阻碍钎料润湿铜管，钎料在氧化皮表面形成点状。所以纯铜管焊接过程中要进行有效的充氮保护（注意充氮压力、充氮方式），正常充氮焊接的铜管钎缝内壁外观良好，较洁净光亮；而未进行充氮焊接的铜管，钎缝内壁会有明显的碎片形成。

6. 钎焊接头的冷却

钎焊后，在钎料凝固前不应移动焊件，否则，接头会开裂和泄漏。另外焊接后不能立即对接头进行急剧冷却，以防止接头开裂。钎焊后如发现焊缝有焊渣，因焊渣对接头有腐蚀作用且影响外观，必须进行清理。

2.1.4 火焰钎焊的操作与防护

火焰钎焊操作时要注意以下问题：

- 1) 严格按照操作规程使用氧燃气设备。
- 2) 钎焊操作时，操作工人要佩戴防护口罩，防止暴露在钎焊过程中放出的有毒的烟气和气体中。
- 3) 防止与热源、火焰和热的金属接触，防止烫伤，尤其当使用氢气时要非常小心，其火焰实际上是看不见的。

2.2 炉中钎焊

炉中钎焊利用电阻炉来加热焊件，其工作示意图如图 3-2-3 所示。炉中钎焊可广泛地用于可以预先将钎料放于接头附近或内部的焊件，该法特别适用于高生产率钎焊。预放置的钎料有丝、箔片、屑块、棒、粉末、软膏和带等形状。按钎焊过程中钎焊区的气氛可分为三类：空气炉中钎焊、保护气氛炉中钎焊和真空炉中钎焊。

炉中钎焊的特点是焊件整体加热，加热均匀，焊件变形小，但加热慢。一炉可以同时钎焊多

件,以弥补加热慢的不足,对批量生产尤为合适。

2.2.1 空气炉中钎焊

将装配好的加有钎料和钎剂的焊件放入普通的工业电炉中加热至钎焊温度。依靠钎剂去除钎焊处的氧化膜,钎料熔化后流入钎缝间隙,冷凝后形成接头。

钎剂可以粉状使用,也可以用水溶液调成糊状使用。一般是先涂在间隙内及钎料上,再放入炉中进行钎焊。为了缩短焊件在高温停留的时间,钎焊时可先把炉温升到稍高于钎焊温度,再放入焊件进行钎焊。

炉中钎焊因加热速度较慢,又是对焊件整体加热,在空气中加热时焊件容易氧化,钎焊温度高时尤为显著,不利于钎剂去除氧化物,故应用受到限制。空气炉中钎焊目前较多地用于钎焊铝和铝合金,这时要求炉膛温度均匀,控温精度不低于 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

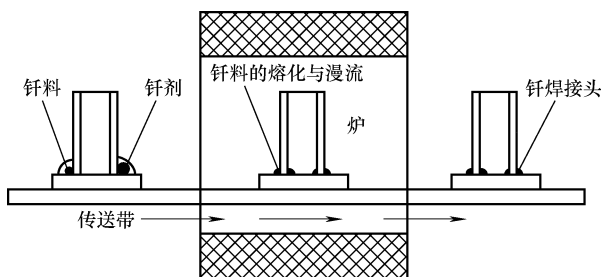


图 3-2-3 炉中钎焊示意图

2.2.2 保护气氛炉中钎焊

保护气氛炉中钎焊也称控制气氛炉中钎焊,其特点是:加有钎料的焊件是在活性或中性气氛保护下的电炉中加热钎焊的。根据所用气氛的不同,可分为还原性气氛炉中钎焊和惰性气氛炉中钎焊。还原性气氛的主要组分是氢和一氧化碳,它不仅能防止空气侵入,还能还原焊件表面的氧化物,有助于钎料润湿母材。还原性气氛的还原能力不但同氢气和一氧化碳的含量有关,而且取决于气体的含水量和二氧化碳的含量。气体的含水量以露点来表示。含水量越小,露点越低。惰性气氛主要包括氮气、氩气和氦气等。工业用的惰性气体是纯净的、干燥的、惰性的,它不会引起金属氧化,但也不能去除氧化物。

保护气氛炉中钎焊设备由供气系统、钎焊炉和温度控制装置组成。供气系统包括气源、净气装置及管道、阀门等。还原性气氛炉中钎焊示意图如图 3-2-4 所示。

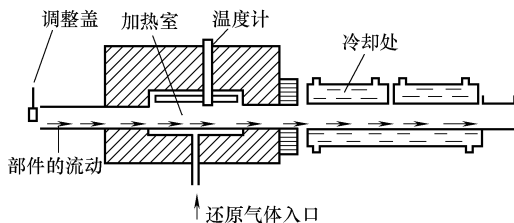


图 3-2-4 还原性气氛炉中钎焊示意图

在高温下,氢气是许多金属氧化物的一种最好的活性还原剂。以氢气作为活性气体时,可使用由氢气发生站输送来的或瓶装供应的气体。净化装置用来清除所用气体中的水和氧等杂质,降低保护气体的露点和氧分压,提高它们的去膜能力。保护气氛钎焊炉一般设有钎焊室和冷却室,有些还有预热室。炉内通入保护气,压力高于大气压力,以防止外界空气渗入。

还原性气氛炉中钎焊时,为了防止氢气中混有空气而引起爆炸,炉子加热前应先通 10 ~ 15min 氢气,以充分排除其中的空气,直到出气管口的火焰燃烧正常后再开始加热。使用惰性气体的炉子和容器时,加热前也应先用气体吹净其中的空气。对于容器,如果按抽真空—充氩—抽真空—充氩的程序重复数次,容器中残余空气含量可降至很低。

2.2.3 真空炉中钎焊

这种钎焊方法是在抽成真空的炉中或焊接室中进行钎焊,过程中不使用钎剂。由于钎焊件处于真空环境下,可以有效地排除空气对焊件的有害影响,因此可以不施加钎剂成功地进行钎焊,特别适合于钎焊面积很大而连续的接头。主要用于钎焊那些难钎焊的金属和合金,如铝合金、钛合金、

高温合金、难熔金属及陶瓷等，能得到光亮致密的接头，具有良好的力学性能和耐蚀性。真空钎焊一般不用于碳钢和低合金钢的钎焊。

真空炉中钎焊的设备主要由真空钎焊炉和真空系统两部分组成。真空钎焊炉大致有两种类型：热壁炉和冷壁炉。热壁炉采用真空室与加热器分开的形式，冷壁炉采用真空室与加热炉一体的形式。真空系统可以通用，应注意的是真空系统应抽真空达到 0.0013Pa 而只含有 $10^{-5} \times 0.1\%$ 的残余气体（体积分数）。图 3-2-5 所示为热壁真空炉工作示意图。在室温时先将装有钎焊件的容器中的空气抽出，然后将容器推进炉内，在炉中加热钎焊件时，抽真空与加热升温同时进行。钎焊后容器可退出炉外冷却，缩短了生产周期，并可防止母材晶粒长大。

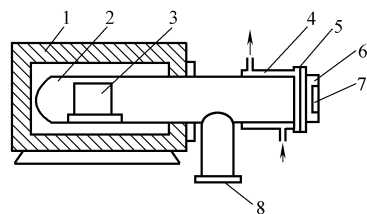


图 3-2-5 热壁真空炉示意图

1—电炉 2—真空容器 3—焊件
4—冷却水套 5—密封环 6—容器盖 7—窥视孔 8—接真空系统

真空炉中钎焊的优点是焊件不受钎剂残渣的有害影响，钎焊质量高，可以方便地钎焊那些用其他方法难以钎焊的金属和合金。与其他高纯度钎焊气氛相比，真空钎焊有如下优点：

1) 抽真空从根本上清除了钎焊区所有的气体，因此不需要去提纯所供给的气氛。工业上真空钎焊所采用的压力一般为 0.065Pa 或更高一些。实际采用的压力取决于所要钎焊的材料、所用的钎料、钎焊界面的面积和钎焊循环中从母材中排出气体的程度。

2) 母材的某些氧化物在真空钎焊温度下会分解。采用特殊技术，可将真空炉中钎焊广泛地用于钎焊不锈钢、超耐热不锈钢、铝合金以及难熔金属和陶瓷。

3) 在真空环境下，从母材中析出的吸附气体，将直接从界面上排出去，而不会污染钎焊界面。

但由于在钎焊前预抽真空以及在冷却时需花费大量时间，且在真空中的热量传递比较困难，故钎焊周期长。此外，真空钎焊设备比较复杂，要求较多的投资，对工作环境和工人技术水平也要求较高。此外，与其他高纯度钎焊气氛相比，真空钎焊的缺点如下：

1) 由于周围压力低，钎料、母材以及其中的元素在钎焊温度下会蒸发。

2) 由于在真空中蒸发的金属蒸气将污染真空环境和抽真空系统，因此真空炉中钎焊不宜使用含高蒸气压元素（如锌、镉、锂、锰、镁和磷等）较多的钎料，也不适于钎焊含这些元素多的合金。

2.2.4 炉中钎焊的操作与防护

对充有保护气氛的钎焊设备进行开炉、操作、停炉和维修时，为了人员和设备的安全，必须遵守操作规程。

炉中钎焊有四道工序：清理焊件、组装和夹持、钎焊、冷却。

(1) 清理焊件 该工序通常限于去除机械加工时焊件表面的油污。比较好的清理方法是碱洗、溶剂清洗和蒸汽去油。

(2) 组装和夹持 炉中钎焊的组件一般都设计成能用压配合、扩口、铆接或其他不需要采用夹具的方法进行组装。将清理过的零件组装起来，并在待钎焊接头内或附近预置钎料。然后，将组件放在托盘上或直接放在传送带上，送入钎焊炉中。

(3) 钎焊 将装配好的组件送入炉子的钎焊室，在适当的保护气氛中加热。当焊件的温度达到高于钎料熔化温度时，钎料润湿并浸流于组件的表面，在毛细作用下进入接头。熔融钎料与焊件表面形成固溶体，从而实现结合。

(4) 冷却 将焊件移入炉子的冷却室, 在保护气氛 (通常与钎焊室的气氛相同) 中冷却。直到焊件被冷却到足够低的温度, 即处于空气中也不会变色的温度 (通常约为 150°C 时), 才将焊件移出冷却室。

在钎焊加热中, 外界空气的渗入、器壁和零件表面吸附气体的释放、氧化物的分解或还原等, 将导致保护气氛中氧、水汽等杂质增多。在钎焊加热的全过程中, 应连续地向炉中或容器内送入新鲜的保护气体, 排出其中已混杂的气体, 使焊件在流动的纯净的保护气氛中完成钎焊。对于排出的氢气, 应点火使之在出气管口烧掉, 以消除它在炉旁积聚的危险。

钎焊结束断电后, 应等炉中或容器中的温度降低至 150°C 以下, 再停止输送保护气体。这是为了保护加热元件和焊件不被氧化, 也是为了防止氢气爆炸。

保护气氛炉中钎焊时, 不能只通过检测炉温来控制加热, 必须直接监测焊件的温度, 对于大件或复杂结构, 还必须监测其多点的温度。

炉中钎焊包括保护气体炉中钎焊和真空炉中钎焊两种。常用保护气体为氢气、氩气和氮气。氩气、氮气不燃烧, 使用时比较安全。氢气为易燃易爆气体, 使用时要严加注意。防止氢气爆炸的主要措施有加强通风。除氢气炉操作间整体通风外, 设备上方要安装局部排风设施, 设备启动前必须先通风。定期检查设备和供气管道是否漏气。若发现漏气必须修复后才能使用。

氢气炉启动前, 应先向炉内充氮气以排除炉内空气, 然后通氢气排氮气, 绝对禁止直接通氢气排除炉内空气。熄炉时也要先通氮气排除氢气, 然后才可停炉。密闭氢气炉必须安装防爆装置。氢气炉旁边应常备氮气瓶, 当氢气突然中断供气时应立即通氮气保护炉腔和焊件。

此外, 氢气炉操作间禁止使用明火, 电源开关最好使用防爆开关, 氢气炉接地要良好。真空炉使用安全可靠, 操作时要求炉内保持清洁, 真空炉停炉时也要抽真空保护, 不得泄漏气体。

钎焊完毕时, 炉内温度降到 400°C 以下, 才可关闭扩散泵电源, 待扩散泵冷却低于 70°C 时才可关闭机械泵电源, 保证钎焊件和炉腔内部不被氧化。

禁止在真空炉中钎焊含有 Zn、Mg、Pb、Cd 等易蒸发元素的金属或合金, 以保持炉内清洁不受污染。

2.3 电阻钎焊

2.3.1 电阻钎焊的基本原理

电阻钎焊又称为接触钎焊, 它是依靠电流通过钎焊处电阻产生的热量来加热工件和熔化钎料的。钎焊时对钎焊处应施加一定的压力。

一般的电阻钎焊方法与电阻焊相似, 是用电极压紧两个零件的钎焊处, 使电流流经钎焊面形成回路, 主要是靠钎焊面及毗邻的部分母材中产生的电阻热来加热。其特点是被加热的只是零件的钎焊处, 因此加热速度很快。电阻钎焊分直接加热和间接加热两种方式, 如图 3-2-6 所示。直接加热电阻钎焊, 电流由电极 1 流向焊件 2 再经过钎料 3, 在钎焊处由于电阻较大产生电阻热, 加热很快, 但要求钎焊面紧密贴合。否则将因接触不良, 造成母材局部过热或接头严重未钎透等缺陷。

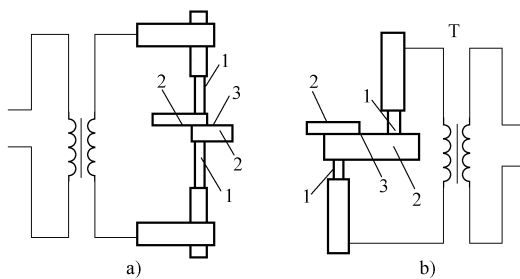


图 3-2-6 电阻钎焊原理图

a) 直接加热图 b) 间接加热图

1—电极 2—焊件 3—钎料

电阻钎焊的优点是加热迅速、生产率高；加热十分集中，对周围的热影响小；工艺较简单、劳动条件好，而且过程容易实现自动化。但适于钎焊的接头尺寸不能太大，形状也不能很复杂，这是电阻钎焊应用的局限性。

2.3.2 电阻钎焊的工艺及特点

电阻钎焊最适于采用箔装钎料，它可以方便地直接放在零件的钎焊面之间。另外，在钎焊面预先镀覆钎料层也是常采用的工艺措施，这在电子工业中应用很广。若使用钎料丝，应待钎焊面加热到钎焊温度后，将钎料丝末端靠紧钎缝间隙，直至钎料熔化，填满间隙，并使全部边缘呈现缓的钎角为止。

电阻钎焊适宜使用低电压大电流，通常可在普通的电阻焊机上进行，也可使用专门的电阻钎焊设备，如电阻钎焊钳或电阻钎焊机。

直接加热电阻钎焊的加热程度由电流大小和压力确定，加热电流为 6000 ~ 15000A，压力为 100 ~ 2000N。电极材料可选用铜、铬铜、钼、钨、石墨和铜钨烧结合金。电极的性能见表 3-2-2。

表 3-2-2 电极的性能

材质	电阻率/($\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{m}$)	硬度 HV	软化温度/ $^{\circ}\text{C}$
钢	1.89	95	150
铜合金	2.0 ~ 2.13	110 ~ 150	250 ~ 450
铜钨合金	5.3 ~ 5.9	200 ~ 280	1000
钨	5.5	450 ~ 480	1000 以上
钼	5.7	150 ~ 190	1000 以上

直接加热的电阻钎焊由于只有焊件的钎焊区域被加热，因此加热迅速，但对工件形状及接触配合的要求高。间接加热电阻钎焊，电流可只通过一个焊件，而另一个焊件的加热和钎料的熔化是依靠被通电加热的焊件的热传导来实现的。也可以将电流通过一个较大的石墨板，焊件放在此板上，依靠由电流加热的石墨板的传热实行加热。间接加热电阻钎焊灵活性较大，对焊件接触面配合的要求较低，但因不是依靠电流直接通过加热的，整个焊件被加热，加热速度慢。适宜于钎焊热物理性能差别大和厚度相差悬殊的焊件，而且对钎焊面的配合要求可适当降低。

电阻钎焊可在通常的电阻焊机上进行，也可采用专门的电阻钎焊设备和手焊钳。电阻钎焊的优点是加热极快，生产率高，但适用于钎焊接头尺寸不大、形状不太复杂的焊件，如刀具、带锯、导线端头、电触头、电动机的定子线圈以及集成电路块元器件的连接等。

2.3.3 电阻钎焊应用实例

电触头是开关电器中直接承担接通和分断电路的元件，其性能好坏直接影响到开断容量、使用寿命及运行可靠性。随着现代工业的快速发展，对电触头的可靠性和电寿命提出了更高的要求。银基电触头材料适用于在各种功率条件下工作，如各种开关、继电器和接触器等大、中负荷电器中。

高压开关中的电触头是最关键的接触元件之一，大都采用 Ag-W 经粉末冶金方法制成，它具有高导热导电性、耐磨性及耐电弧性能，但焊接性较差。而 Ag-W 电触头和触板的连接在生产中采用电阻钎焊实现。

试验用触头材料为 AgW50，在其焊接表面有一层银（是在制备触头材料时熔渗所剩余的银），触头规格为准 7mm × 5mm 的圆片，其物理和力学性能见表 3-2-3。触板为 T2 纯铜，规格为准 10mm × 5mm 的圆片。钎焊材料选用 Ag-Cu-Zn 合金，因为 Ag-Cu-Zn 合金钎料的特点是熔化温度较低，润湿性及填缝能力好，接头强度高且能承受振动载荷。钎料片的厚度为 0.06mm，其化学成分和性能见表 3-2-4。钎焊时所用钎剂为 102 钎剂。

表 3-2-3 AgW50 触头材料的物理和力学性能

密度/(g/cm ³)	硬度 HBW	电阻率/(μΩ/cm)	导电度(IACS, %)	抗弯强度/MPa
13.15	105	3.0	57	600

表 3-2-4 BAg45CuZn 钎料的化学成分和性能

成分(质量分数, %)			结晶温度/℃	抗拉强度/MPa	电阻率/(μΩ/m)
Ag	Cu	Zn			
45 ± 1.0	30 ± 1.0	余量	677 ~ 743	350 ~ 400	0.092

焊前把石墨上、下电极座装于点焊机极臂上，并调好其行程，使上、下电极面平整。焊接时，按图 3-2-7 所示顺序摆放好触头、纯铜和钎料片，并在钎料片表面涂上钎剂，调节焊接电流为 65 ~ 75A，采用手动加压，通电加热，待纯铜发红，钎料熔化并向四周均匀渗出时（约 800℃）停止通电。稍冷却至钎料凝固，取出焊件。

在焊接电流、电极材料和焊件表面处理方式相同的条件下，影响电阻钎焊质量的最主要因素有钎焊压力及钎焊时间。

如图 3-2-8 所示，起始时接头强度随着压力的增加而提高，当压力达到某一值时，接头的强度达到最大值；若继续增加压力，熔化的钎料因压力的作用会部分被挤出钎缝而流失，降低其扩散和润湿作用，使得接头强度下降；当压力增大到一定程度时，钎料将全部流失，并使钎接处产生较大的变形，导致钎接失败。反之，若压力过小，使钎缝处于点接触，电阻增大，出现局部过热并产生火花，烧坏接头。AgW50 和纯铜电阻钎焊时，钎焊压力应控制在 1.3 ~ 1.5 MPa。

在压力一定的条件下，接头强度与钎焊时间的关系如图 3-2-9 所示。可以看出，钎焊时间过长或太短，接头强度都会降低。若钎焊时间过长，接头处热量将剧增，温度不断上升，造成液体钎料流失，强度降低；而钎焊时间太短，接头电阻产生的热量不够，钎料来不及充分润湿被焊金属，从而使钎料流布不均匀，接头强度降低。钎焊时间控制在 3.5 ~ 4.5 s，AgW50 和纯铜电阻钎焊可获得最高的接头强度。

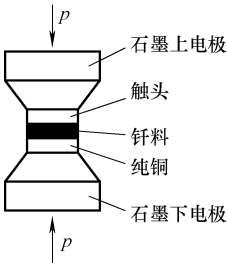


图 3-2-7 电阻钎焊结构图

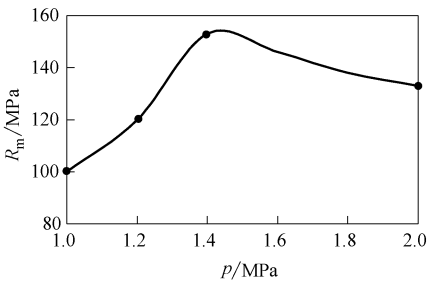


图 3-2-8 接头强度与钎焊压力的关系

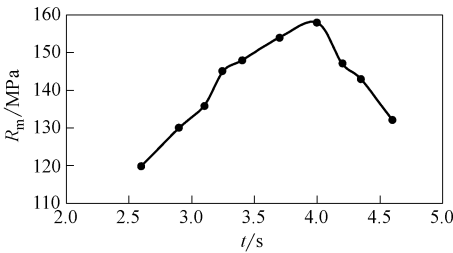


图 3-2-9 接头强度与钎焊时间的关系

2.4 感应钎焊

2.4.1 感应钎焊的基本原理

感应钎焊是将焊件的待钎焊部分置于交变磁场中，依靠这部分母材在交变磁场中产生感应电流

的电阻热来加热的钎焊方法,基本原理如图 3-2-10 所示。由于热量由焊件本身产生,因此加热迅速,焊件表面的氧化比炉中钎焊少,并可防止母材的晶粒长大和再结晶的发展。此外,还可实现对焊件的局部加热。

感应钎焊的优点如下:

- 1) 选择感应电流作为热源,充分利用局部加热的方式对焊件进行加热,通常可以减小构件的性能变化以及焊件变形,消除可能发生的对接头周围焊件的烧损。
- 2) 精确的加热控制,稳定的工艺循环,提供了外观平整、光滑、均匀的接头。
- 3) 加热速度快,正常的感应加热循环因为加热速度快,变色轻并避免结垢,通常允许在空气中加热。
- 4) 需要时,感应器和控制箱可采用柔性连接,满足在工件移动的过程中钎焊接头。感应钎焊可应用于自动生产线,以预置钎料的方式进行。
- 5) 使用感应钎焊可减少和简化夹持工装。感应钎焊的加热范围小,增加了所用工装的寿命,保持了被连接部件的尺寸精度。

其缺点如下:

- 1) 配套系统复杂,尽管通过设计感应器能成功地加热几何形状复杂的接头,但包含几个钎焊接头的复杂组件,加热难度很大甚至不能实现,对这种组合接头推荐采用炉中钎焊。
- 2) 部件的装配难度大。感应钎焊要求待连接焊件的装配间隙适当缩小。
- 3) 设备的初装费用高。感应钎焊设备特别适合半自动或全自动操作。
- 4) 所需技术含量较高,普通人员不易掌握。在使用感应钎焊时,不仅要选择感应发生器和合适的部件操作设备,而且要设计符合加热方式的线圈、载荷(焊件、线圈、机头)和发生器之间电的绝缘耦合。

在线圈的交变磁场中,导体内产生的感应电流强度可由下式确定:

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{4.44 \times 10^{-8} f \omega \Phi}{Z} \quad (3-2-1)$$

式中 Z ——工件的阻抗,单位为 Ω ;

E ——电动势,单位为 V;

f ——频率,单位为 Hz;

ω ——感应线圈的匝数;

Φ ——磁通,单位为 Wb。

如式(3-2-1)所示,焊件中产生的感应电流的大小与感

应线圈回路中的交流电的频率、感应线圈的匝数和磁通成正比。随着所用的交流电频率的提高,感应电流增大,焊件的加热速度变快。因此,感应加热大多使用高频交流电,有时也使用中频交流电,工频很少用于感应钎焊。但由于交流电有趋肤效应,通常取 85% 的电流所分布的导体表面层厚度称为电流渗透深度,它可由式(3-2-2)确定:

$$\delta = 5.03 \times 10^4 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad (3-2-2)$$

式中 δ ——导体中的电流渗透深度,单位为 mm;

ρ ——导体的电阻率,单位为 $\Omega \cdot \text{mm}$;

μ ——导体的磁导率,单位为 H/m。

显然,感应加热的厚度取决于电流的渗透深度。式(3-2-2)表明,电流渗透深度与电流的频率有关。频率越高,电流渗透深度越小。虽然高频电流使表面层迅速加热,但加热的厚度却很薄,

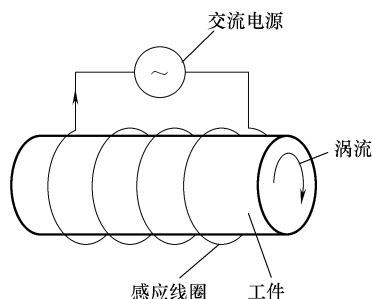


图 3-2-10 感应加热原理示意图

焊件的内部只能靠表面层向内部的导热来加热。由此可见,选用过高的交流电频率并不是有利的。一般感应钎焊的频率为 500kHz 左右。

电流渗透深度也与材料的电阻率和磁导率有关。电阻率越大,磁导率越小,则电流渗透深度就越深。非磁金属如铜、铝等,磁导率较小,且不随温度变化,趋肤效应都较小。在确定钎焊参数时必须考虑母材的有关物理性能对电流渗透深度的影响。

感应钎焊所用的设备主要由两部分组成,即交流电源和感应线圈。另外,为了夹持和定位焊件,还需使用辅助夹具。

2.4.2 感应加热线圈的设计

感应线圈是传递感应电流的部件,感应线圈设计的好坏对加热影响很大。正确设计和选用感应线圈的基本原则是:保证焊件加热迅速、均匀及效率高。在生产中,为感应钎焊特定接头而设计的感应线圈,尤其是对复杂形状接头的线圈设计,需要依靠经验并经试验而定。几种最基本的感应线圈的典型结构,如图 3-2-11 所示,其中图 3-2-11b 的圆筒形线圈外部的电磁场比部件中的略少,热效率高;图 3-2-11c 的板状集中式线圈在小的焊件面积上汇聚了高密度的电磁场;图 3-2-11g 的中开式筒形线圈为将要连接的垂直管组面,提供了均匀的加热。每一种基本设计具有适合于各种部件几何尺寸的特色。实际上,感应线圈是为每一种特殊应用设计的。当钎焊断面大小不一的部件时,可以通过合并各种基本设计形式,来调节加热方式。

感应线圈通常用纯铜管制成,工作时管内通水冷却,管壁厚度应不小于电流渗透深度,一般为 1~1.5mm。感应线圈与焊件之间应保持间隙以避免短路,为了提高加热效率,感应线圈应制成与钎焊的接头相似的形状,并与焊件保持不大于 3mm 的均匀间隙。感应线圈的匝间距离一般为管径的 0.5~1 倍,应尽可能采用外热式感应线圈,它比内热式感应线圈的加热效率高。

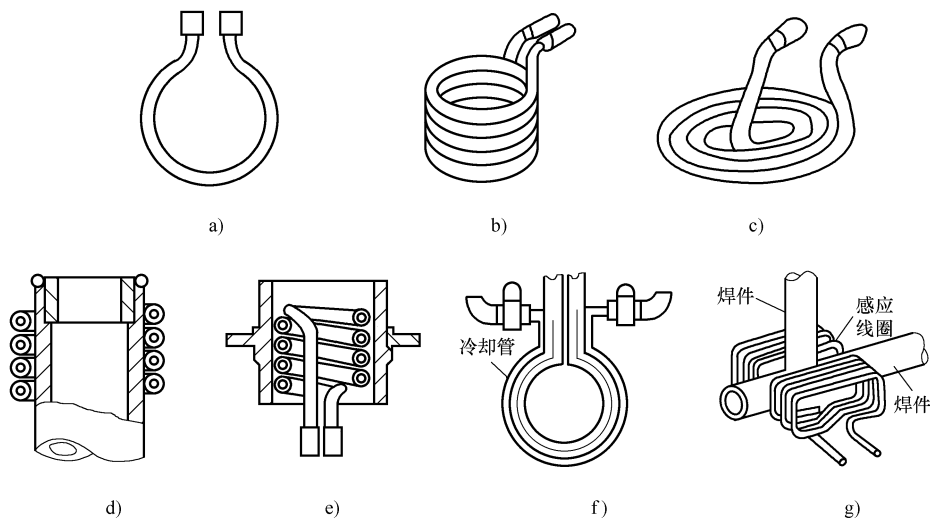


图 3-2-11 感应线圈的典型结构

- a) 单匝感应线圈 b) 多匝感应线圈 c) 扁平式感应线圈
d) 外热式 e) 内热式 f) 单匝管式线圈 g) 中开式线圈

2.4.3 感应钎焊的应用实例

在飞机制造与维修过程中,有大量系统导管需要进行连接,特别是航空发动机管件通常采用感应钎焊的方法进行连接。

PW4000 航空发动机的 4 号轴承润滑油压力管材质为不锈钢，接头进行感应钎焊。所用钎料为 AMS 4772 银钎料 54Ag-40Cu-5.0Zn-1.0Ni（质量分数，%），形状为丝状，其直径为 0.4 mm。感应加热器型号为 SP-25A，温度测定采用红外测温仪，其精度为 0.5℃，可测量温度范围为 400 ~ 1200℃，测温点选择在导管接头部位，通过采集钎焊管件表面加热温度的信号来对加热参数进行控制。

航空发动机管件钎焊修复的工艺过程包括管路表面的清理、钎剂与钎料的预置、钎焊定位、感应钎焊、焊后处理。

1. 发动机管路表面清理工艺

钎焊工艺对焊件表面清洁度要求非常严格，清洁度不仅影响接头的外观质量，还影响焊件对钎料的吸附，直接影响钎焊质量。为此，在装配前必须清理待钎焊部位表面上的污物、砂粒、滑油、油脂或其他有害材料。发动机管路零件感应钎焊的预处理包括酸碱电化学清洗残留钎料和表面喷砂清除氧化皮。

2. 钎剂和钎料的预置与发动机管路与待钎接头的定位

预置钎剂和钎料是感应钎焊的重要工序之一，首先将 AMS 3411 钎剂均匀涂敷到钎焊部位及相邻的高温区域，然后将 AMS 4772 钎料加工成环状，放置方式如图 3-2-12 所示。

管路接头的安装、定位和间隙控制对感应钎焊接头质量的影响很大，接头安装形式如图 3-2-13 所示，使零件在钎焊时处于正确的位置，从而实现钎焊间隙的装配。

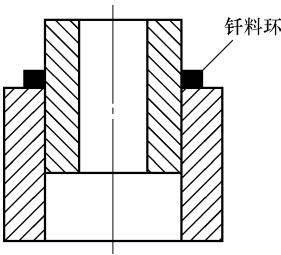


图 3-2-12 钎料环放置方式示意图

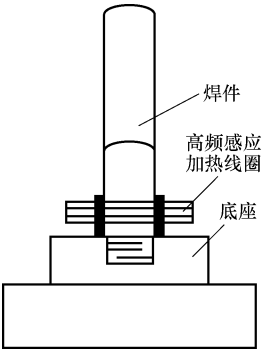


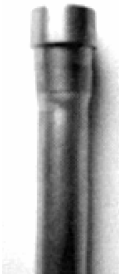
图 3-2-13 钎焊管路接头的安装形式

3. 发动机管路感应钎焊工艺

接头的装配间隙是影响钎焊质量和接头强度的主要因素，本修复工艺中间隙为 0.05mm ± 0.01mm。为获得优良的钎缝组织，且不损伤母材，应选用适当的升温速度将钎焊接头部位局部加热至 840℃ ± 5℃，保温 60 s，然后继续加热至 940℃ ± 5℃，保温 30 s，实现钎焊连接，然后以不高于 19℃/min 的冷却速度将管路零件钎焊部位冷却至室温，以防止钎缝出现裂纹和其他缺陷。

4. 发动机管路钎焊焊后处理的工艺

由于钎焊过程中所采用的钎剂中含有氟化物，焊后如有残留将影响钎焊接头的质量，所以采用如下工艺去除残留氟离子：将零件接头完全浸泡在 66 ~ 93℃ 的热水中，水煮至少 5min，然后快速干燥。经感应钎焊的航空发动机管接头如图 3-2-14 所示。



2.4.4 感应钎焊的操作与防护

感应钎焊可分为手工、半自动和自动三种方式。手工感应钎焊时，焊件的装卸、钎焊过程的实施和调节都靠手工操作。这种方式只适用于简单焊件的小批量生产，生产效率低，对工人的技术水平要求高，但它具有较

图 3-2-14 航空发动机感应钎焊管接头

大的灵活性。半自动感应钎焊，焊件的装卸和通电加热仍靠人工操作，但钎焊过程的断电结束是自动控制的。自动感应钎焊使用的感应线圈是盘式或隧道式。工作时感应线圈一直通电，利用传送带或转盘把焊件连续送入感应线圈中。焊件所需的加热是靠调整传送机构的运动速度、控制焊件在感应线圈中的时间来保证的。这种生产方式生产率高，主要用于小件的大批量生产。

感应钎焊时，焊件置于感应线圈中或近旁，难以送进钎料。因此宜在装配时预先把钎料和钎剂放好。可使用箔状、丝状、粉末状和膏状的钎料。安置的钎料不宜形成封闭环，以免因自身的感应电流加热而过早熔化。由于加热迅速，应选用毛细流动性能好的钎料。

感应钎焊可采用钎剂和气体介质去膜。液态和膏状的钎剂最便于使用。采用气体介质去膜时，焊件需置于容器中，感应线圈的安放方式有两种：一种是置于容器外，靠感应加热容器来加热焊件。此时，容器材料应是导体。另一种是置于容器内，焊件靠感应线圈直接加热。

感应钎焊在工业生产中应用得越来越多，其操作与防护主要体现在电器设备、所含的腐蚀钎剂、热的材料、在控制气氛钎焊中潜在爆炸危险、在清洗和工艺中使用的化学品等方面。

主要的预防措施有以下方面：

- 1) 为接通发生器提供安全的开关。
- 2) 在感应线圈上涂防护层，机械覆盖。
- 3) 隔离机头和其他附属电器设备。
- 4) 从钎剂和一些钎料中散发出有毒的烟尘和气体，因此钎焊场所要求通风良好。

2.5 浸渍钎焊

浸渍钎焊是把钎焊件局部或整体浸入盐混合物溶液（称为盐浴）或钎料溶液（称为金属浴）中，依靠这些液体介质的热量来实现钎焊过程。

这种钎焊方法，由于液体介质的热容量大、导热快，能迅速而均匀地加热钎焊件，钎焊过程的持续时间一般不超过 2min。因此，生产率高，焊件的变形、晶粒长大和脱碳等现象都不显著，特别适于大量生产。钎焊过程中液体介质又能隔绝空气，防止焊件氧化。并且，溶液温度能精确地控制在 ±5℃ 范围内，因此，钎焊过程容易实现机械化。有时还能同时完成淬火、渗碳、碳氮共渗等热处理过程。由于这些特点，工业上广泛使用这种方法来钎焊各种合金。

按使用的液体介质不同，浸渍钎焊分为盐浴浸渍钎焊和金属浴浸渍钎焊两类。

2.5.1 盐浴浸渍钎焊

盐浴浸渍钎焊时，焊件的加热和保护都是靠盐浴来实现的，因此盐混合物的成分选择对钎焊质量影响很大。对盐混合物的基本要求是：具有合适的熔点、对焊件能起保护作用而无不良影响、使用中能保持成分和性能稳定。一般多使用氯盐的混合物。一些常用的盐混合物成分见表 3-2-5，适用于用铜基钎料和银基钎料钎焊碳钢、合金钢、铜及铜合金和高温合金。在这些盐溶液中浸渍钎焊时，需使用钎剂去除氧化膜。当浸渍钎焊铝及铝合金时，可直接使用钎剂作为盐混合物。

表 3-2-5 钎焊用盐浴成分

成分(质量分数,%)				$t_m/^\circ\text{C}$	$t_B/^\circ\text{C}$
NaCl	CaCl ₂	BaCl ₂	KCl		
30	—	65	5	510	570 ~ 900
22	48	30	—	435	485 ~ 900
22	—	48	30	550	605 ~ 900
—	50	50	—	595	655 ~ 900
22.5	77.5	—	—	635	665 ~ 1300
—	—	100	—	962	1000 ~ 1300

为了保证钎焊质量,必须定期检查盐浴的组分及杂质含量并加以调整。

盐浴钎焊的基本设备是盐浴槽。工业用盐浴槽大多是电加热的,其加热方式有以下两种。

1) 外热式:即由槽外电阻丝加热,它的加热速度慢,且盐浴槽必须用导热好的金属制作,由于不耐盐溶液的腐蚀,因此应用不广。

2) 内热式:它靠电流通过盐溶液时产生的电阻热来加热自身并进行钎焊。其内壁采用耐盐溶液腐蚀的材料制成,一般用高铝砖或不锈钢。铝钎焊盐浴槽采用碳钢或纯铜制成,电极材料为石墨或不锈钢。为了操作安全,均用低电压(10~15V)、大电流的交流电加热。当电流通过盐溶液时,由于电磁场的搅拌作用,整个盐溶液温度比较均匀,可控制在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 范围内。

盐浴钎焊时,盐溶液的黏滞作用和电磁循环作用可能使零件和钎料错位,因此必须对组件进行可靠的定位。使用敷钎料板是最方便的;其次是使用钎料箔,将其置于钎缝间隙内。

盐浴钎焊时,除了用铜基钎料钎焊结构钢时可以不用钎剂去膜,其他情况下仍需使用钎剂。加钎剂的方法,一般是把焊件浸入熔化的钎剂中或钎剂水溶液中,取出后加热到120~150 $^{\circ}\text{C}$ 除去水分。

为了减少焊件浸入时盐溶液温度的下降,缩短钎焊时间,并保持均匀加热,可先将焊件置于电炉内预热到低于钎焊温度200~300 $^{\circ}\text{C}$ 。

钎焊时,焊件通常以一定的角度倾斜浸入盐浴池,以免空气被堵塞而阻碍盐溶液流入,造成漏钎。钎焊结束后,焊件也应以一定角度取出,以便盐溶液流出,但倾角不能过大,以免尚未凝固的钎料流动或流失。

钎焊前,一切要接触盐溶液的器具均应预热除水,防止接触盐溶液时引起盐溶液猛烈喷溅。

盐浴钎焊的优点是生产效率高,容易实现机械化,适宜于批量生产。不足之处是其不适于间隙操作,焊件的形状必须便于盐溶液能完全充满和流出,而且盐浴钎焊成本高,盐溶液遇水有爆炸的危险,污染严重,现已不大采用这种钎焊方式。

2.5.2 金属浴浸渍钎焊

金属浴浸渍钎焊是将经过表面处理并装配好的焊件浸入熔态钎料中,依靠熔态钎料的热量使焊件加热到规定温度。与此同时,钎料渗入焊件接头间隙中,并在焊件提起时保持在间隙内,然后凝固形成接头,完成钎焊过程。

施加钎剂的方式有两种:一种是将焊件浸入熔化的钎剂中,取出干燥后再浸入熔态钎料;另一种是在熔化的钎料表面加一层熔态钎剂,焊件通过熔态钎剂时就沾上了钎剂。为了防止熔态钎剂的失效,必须不断更换或补充新的钎剂。在后一种情况下,熔态钎剂又可防止熔态钎料的氧化。

这种钎焊方法的优点是装配容易(不必安放钎料),工艺简单,生产率高。特别适合于钎缝多而复杂的焊件,如散热器。其缺点是焊件表面沾满钎料,增加了钎料的消耗量,必要时还需清除表面不应沾留的钎料。又由于钎料表面的氧化以及浸渍时混入污物和母材的溶解,熔态钎料成分容易发生变化,需要不断地精炼和进行必要的更新。

这种钎焊方法主要用于以软钎料钎焊钢、铜及铜合金。特别是对那些钎缝多而密集的产品,诸如蜂窝式换热器、电机电枢、汽车散热器等,用这种方法钎焊比其他方法优越。

各种方式的金属浴浸渍钎焊在电子工业中应用甚广,如波峰焊就属于此类钎焊方法,已在电子设备生产中占有重要地位。波峰焊又可分为单波峰焊和双波峰焊以及喷射空心波峰焊等。图3-2-15所示为双波峰焊示意图。与一般的金属浴浸渍钎焊过

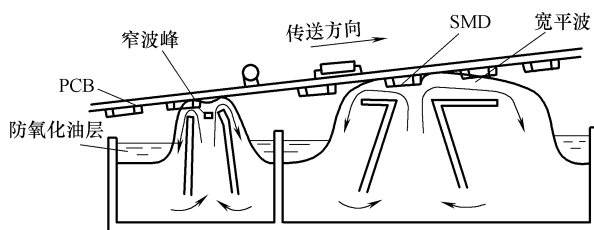


图 3-2-15 双波峰焊示意图

程相反,波峰焊是用泵将液态钎料不断向上喷起,形成波峰去接触随传送带前进的印制电路板底面,实现元器件的引线 with 焊盘的钎焊连接。

2.5.3 浸渍钎焊应用实例

ATR 密闭机箱是军用电子装备的重要组成部分,要求机箱具有优良的传导散热性和电磁屏蔽功能,适应防湿热、盐雾和霉菌等环境要求。机箱的侧壁设计为内藏散热翅片结构,极大地增加了机箱表面的散热面积,这种结构采用了盐浴钎焊的方法来制造。

焊接设备包括 RDMZS-100-6 盐浴炉、RJJ-60-6 预热炉、NDR5 氩弧点固机以及 ET6800 氯离子测量仪。

钎料采用 GWLHL81-01Al-Si-Sr-La 钎料,其化学成分和熔化温度见表 3-2-6。焊剂为 ALU-BRAZE860 AF LC。

表 3-2-6 GWLHL81-01Al-Si-Sr-La 钎料的化学成分和熔化温度

钎料	化学成分(质量分数,%)				熔化温度/℃
	Al	Si	Sr	La	
Al-Si-Sr-La	87.94 ~ 87.97	12	0.03 ~ 0.06	0.03 ~ 0.06	577 ~ 582

箱体的装配及焊接工艺流程为:清洗—装夹钎料—装配—预热—盐浴钎焊—焊后清洗。

由于铝合金对氧的亲合力极大,表面极易生成一层 Al_2O_3 氧化膜,熔点达 2050°C ,致密而稳定,比较难以去除。为了保证焊接质量,钎焊前需要仔细清洗焊件,目的是把焊件表面的油渍及厚氧化膜去除。具体过程是先把所有焊件放在加缓蚀剂的 60°C Na_2CO_3 溶液中煮洗,然后在 40°C NaOH 溶液中煮洗,再用清水清洗,用酸中和光泽处理,并用纯水漂洗后进行烘干。

当组件浸入盐浴池时,预热可使热盐温度冲击造成的焊接组件变形减到最小,另外,预热还能减少组件对盐浴池的冷却作用。预热温度为 $500 \sim 540^\circ\text{C}$,保温 $2 \sim 5\text{min}$ 。

盐浴钎焊时应尽可能保证密闭通道内空气排出,防止空气被封闭在空腔内阻碍熔盐润湿所有待钎表面。焊接温度为 $600 \sim 610^\circ\text{C}$,焊接持续时间为 $5 \sim 10\text{min}$ 。一旦钎焊完成,就必须将所有残留在组件上的盐倾倒在干净,以便后道工序的清洗。

盐浴铝钎焊的加热介质是液体熔盐,其主要成分分为两部分:一是碱金属或碱土金属卤化物的混合盐,称为熔盐基质;二是含氟的共晶盐。前者起到维护熔盐基本熔化温度和粘度的作用,而后者是去除铝氧化膜的关键成分。氟化物钎剂在钎焊过程中依靠溶胀作用使氧化膜强度下降,同时氧化剂的存在降低了金属的表面张力使钎料易于铺展。

熔盐准备过程中,要保证熔盐的 pH 值为 $5.3 \sim 7.0$ 。如果 pH 值超过 7.0,则需 AF 添加剂调节。盐熔化后,脱水处理至关重要,一方面去除熔盐中的水分,另一方面置换熔盐中的杂质金属离子,从而减少焊件在焊接过程中的腐蚀,保证了钎焊件外观质量。

焊后清洗检测将待测风道内注满蒸馏水或去离子水,放置 4h 后,用离子测试仪进行 Cl^- 含量检测试验, Cl^- 的增加量应 $\leq 6\text{mg/L}$ 。

2.6 其他钎焊方法

2.6.1 电子束钎焊

电子束钎焊的加热原理与电子束焊相同,是利用在真空下,被磁或静电聚焦棱镜聚焦的电子流在强电场中高速地由阴极向阳极运动中,电子与零件的钎焊面(阳极)碰撞的动能转变为热能来实现钎焊加

热。与电子束焊不同的是,由于钎焊要求的加热温度要低得多,因此通常采用扫描或散焦电子束。

电子束钎焊要求用高真空和高精度的操纵装置,设备复杂、钎焊过程生产率低、成本高。

2.6.2 扩散钎焊

扩散钎焊是以钎缝形成的基本过程命名的,其最主要特征是在钎焊加热过程中钎焊间隙内形成的液态合金,不是像一般钎焊方法那样因随后降温凝固而形成钎缝,而是在高于钎料固相线温度的条件下长时间保温,使之等温凝固而形成钎缝。

钎缝等温凝固的机理是:在加热保温过程中,间隙中的钎料熔化后,随着母材的熔入和钎料中的低熔点组元或起降低钎料熔化温度作用的组元(降凝剂)的散失,间隙中液态合金的固相线温度逐渐升高,当这种过程持续进行而使合金的固相线温度升高到超过加热温度后,合金即发生等温凝固。扩散钎焊方法的热过程和钎缝凝固过程及其与一般钎焊方法的区别如图3-2-16所示。

实现扩散钎焊过程的基本条件是在钎焊温度下,母材对于钎料中的低熔化温度组元或降凝剂组元具有足够宽的固溶体区域。其钎焊过程一般可分为三个阶段:第一阶段发生的过程与一般钎焊过程相同,即固相与液相之间有限的相互扩散;第二阶段,液相逐渐凝固;第三阶段是在固态下发生的均匀扩散过程。

扩散钎焊由于需要长时间加热保温,故最适宜于采用保护气氛炉中加热和真空炉中加热的方法。扩散钎焊使用的钎料成分一般不同于常规钎料,并且其获得方式除类似常规钎料靠熔炼制备外,在不少场合是通过加在母材表面的金属镀层或夹在间隙中的金属箔,加热中与母材接触反应来形成的。扩散钎焊的主要过程参数是钎缝间隙宽度、过程的温度和时间;而过程的温度和时间又取决于间隙宽度和间隙中液态合金的低熔化温度组元或降凝剂组元的相对含量。因此应施加适当的压紧力,以尽可能保持最小的钎缝间隙。

扩散钎焊的价值在于改善钎焊的结晶过程,可保证得到平衡的钎缝组织,提高它的强度、塑性、耐蚀性和重熔温度等,消除在某些情况下钎缝结晶中可能出现的低熔点组织或脆性相。

扩散钎焊在连接活性金属和难熔金属零件时应用较多,但与一般钎焊方法相比,生产周期长,成本也较高。

2.6.3 超声波钎焊

超声波钎焊是利用超声波振动传入熔化钎料,利用钎料内发生的空化现象破坏和去除母材表面的氧化物,使熔化钎料润湿纯净的母材表面而实现钎焊。其特点是钎焊时不需要钎剂。

超声波钎焊法常应用于低温软钎焊工艺。随着温度升高,空化破坏加剧。当零件受热超过400℃,则超声波振动不仅使钎料的氧化膜微粒脱落,而且钎料本身也会小块小块地脱落,因此通常先将零件搪上钎料,再利用超声波烙铁进行钎焊。

2.6.4 钎焊新技术

1. 激光钎焊

激光钎焊即是以激光为热源的钎焊技术,利用激光束优良的方向性和高功率密度的特点,通过

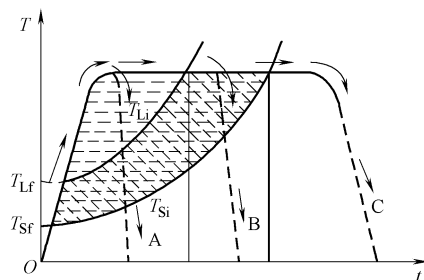


图3-2-16 一般钎焊方法(A、B)和扩散钎焊(C)的热过程和钎缝凝固过程
 T_{Sf} 、 T_{Lf} 、 T_{Si} 、 T_{Li} —分别为钎料的固相线、液相线温度、钎缝的固相线、液相线温度
实线—加热过程 虚线—冷却过程

光学系统将激光束聚集在很小的区域,很短的时间内在接头处形成一个能量高度集中的局部加热区,熔化钎料,与母材润湿,完成连接。按照钎焊时所用钎料熔点的高低,激光钎焊又可分为激光软钎焊和激光硬钎焊。激光软钎焊技术常用于印制电路板上焊接电子元件、片状元件的组装等,这是由于激光束可实现对微小面积的高速加热,热影响区小,光辐射时间和输出功率易于控制,而且易于分光实现多点同时对称焊,具有很大的灵活性。

激光硬钎焊也称激光填丝钎焊,随着激光焊接设备成本的降低,激光钎焊技术逐步大规模应用于汽车制造领域。如图3-2-17所示,其原理为:利用激光光束作为热源,聚焦后的光束照射在填充的焊丝表面,焊丝在光束能量持续加热下熔化形成高温液态金属,液态金属浸润到被焊零件连接处,在适当的外部条件下,使之与焊件间形成良好的冶金结合。需要注意的是:焊件间的连接是通过钎料熔融金属实现的,母材本身不能被激光严重熔蚀损伤。

激光钎焊时同样伴随着等离子体效应,其产生的机理为:保护气体和焊接过程中产生的金属蒸气,在激光作用下发生电离,从而在焊缝上方形成等离子体。等离子体对激光有吸收、折射和散射作用,因此熔池上方的等离子体会削弱到达焊件的激光量,影响光束的聚焦效果,对焊接不利。

激光钎焊的优点如下:

- 1) 它只产生一个局部的钎焊连接,而不需要整个零件或元件加热到钎料的漫流温度。
- 2) 激光束热能的可控程度很高,包括可控制光束强度、束斑尺寸、加热持续时间,以及可精确地局部加热或限位加热。
- 3) 由于固体相对于激光波长来说是透明的,激光束易于通过固体而被传输,因此激光钎焊可在密封的真空内或充有高压气体的封装物内进行。
- 4) 容易实现自动化,能有效控制光束强度和精细定位。

激光钎焊的局限性有以下方面:

- 1) 要求焊件装配精度高,且要求光束在焊件上的位置不能有显著偏移。这是因为激光聚焦后光斑尺寸小,焊缝窄,需动态填充金属钎料。若焊件装配精度或光束定位精度达不到要求,很容易造成焊接缺陷。
- 2) 激光器及其相关系统的成本较高,一次性投资相对较大。
- 3) 激光焊技术复杂,技术难度大,涉及光学、焊接学、自动化系统工程,焊接系统调试复杂。
- 4) 激光危险,防护等级高。系统设备需要专业维护,核心设备故障停机或损坏后,修复难度大(如激光头、光源),且激光焊接系统占地面积较大。

在大多数应用场合下,将激光束直接指向接头上的预置钎料从而完成一条钎缝的钎焊。一般来说,激光钎焊时,焊件将位于固定的激光束之下。将焊件定位于激光束焦点上方以求得光束的能量密度与光束宽度之间的适当平衡。激光钎焊时,预先将钎料放置在接头内。钎料呈粉状或填隙片状,将其装在待钎焊零件之间。

任何激光钎焊过程,不论是否采用钎剂,甚至采取了措施来保证连接区不受污染,均需采用适当的气氛保护。根据材料的成分、钎料合金的纯度以及其他因素,可决定钎焊时是否采用钎剂,但总要采用一种保护气氛(氩气保护或真空)。当采用钎剂时,可用水或酒精使其与粉状钎料混合而成膏状并涂于接头内,钎焊前必须将膏状钎剂彻底干燥。

激光钎焊时需要调节的参数包括以下几种:

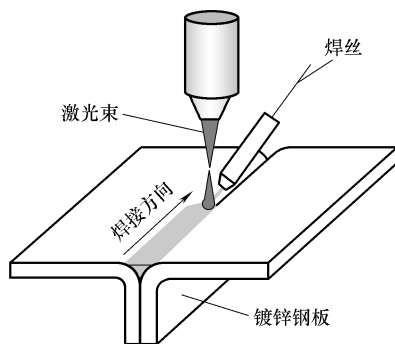


图 3-2-17 激光填丝钎焊示意图

(1) 激光光斑参数

1) 离焦量: 激光焊通常需要一定的离焦量来实施焊接, 激光焦点处光斑中心的功率密度过高, 容易蒸发成孔。离开激光焦点的各平面上, 功率密度分布相对均匀。离焦方式有正离焦与负离焦两种。焦平面位于焊件上方为正离焦, 反之为负离焦。

2) 功率密度: 功率密度是激光焊中最关键的参数之一, 它表示光斑的单位面积内光量的分布。采用较高功率密度, 在微秒级时间内, 表层即可加热至沸点, 产生大量汽化。采用较低功率密度, 表层温度达到沸点需要经历数毫秒, 在表层汽化前, 底层达到熔化温度, 易形成良好的熔融焊接。

(2) 光束位置 焊接时, 光束宜与焊缝表面垂直, 特殊情况除外。

(3) 材料的焊接冶金属性及光学属性 熔点、沸点、镀锌层是确认激光钎焊各种参数的基础; 材料光吸收率则代表了填充剂和母材有效吸收光量的能力。

(4) 送丝速度 在一定的功率强度下, 只有调试出适当的送丝速度才可以保证钎料丝的单位时间熔化量, 形成完美的焊缝, 送丝太快或太慢都会导致焊接缺陷。

(5) 加工速度 即焊接速度、生产节拍, 一般与工业化设计能力相关。

(6) 加热电流 一般根据填充钎料丝是否需要加热电流, 可以把激光钎焊分为冷丝焊和热丝焊。在钎料丝与部件的过渡处会产生一个接触电阻, 通以电流, 可起到加热焊丝和局部母材的作用, 改善金属的光能吸收效率。

目前, 随着激光技术的发展, 激光钎焊技术已在汽车车身焊接、电子组装等领域得到了广泛的应用。

2. 红外钎焊

红外线是电磁波谱中波长介于红光和微波之间的电磁辐射, 它不能引起视觉, 但有显著的热效应。同时, 红外线很容易被物体吸收, 在通过有悬浮粒子的物质时不容易发生散射, 具有较强的穿透能力。在工业上红外线被广泛用作热源。红外线钎焊就是利用红外线辐射能来加热焊件和熔化钎料的钎焊方法。

用作钎焊热源的一种主要红外线辐射器是大功率石英白炽灯。如在石英灯上附加抛物面聚焦装置, 可以对小型部件进行点状钎焊。这种钎焊装置目前已用于印制电路板上小型元器件的钎焊连接。

电热毡钎焊是红外线钎焊的另一种形式。电热毡是由上、下加热垫组成。垫内安放有冷却水管, 垫的表面安置着加热元件, 其形状与焊件外形 (一般为蜂窝壁板) 相同。焊件放在密封容器内, 容器置于加热垫之间, 抽真空并充氩后加热钎焊。在加热中热量的辐射起到主要作用。

3. 电弧钎焊

电弧钎焊是一种新型的钎焊工艺。钎焊时电弧位于焊件与熔化极之间, 周围是惰性气体。钎料作为电弧的一个电极, 从焊枪中连续送进钎焊区, 形成钎焊焊缝的填充金属。

电弧钎焊具有节能高效的特点, 同时由于氩气流对电弧具有压缩作用, 热量较集中, 加热升温速度快, 钎焊接头在高温停留时间短, 母材金属不易产生晶粒长大现象, 热影响区窄, 其组织与性能变化也较小, 焊缝成形美观, 速度快, 钎焊接头强度较高。用于镀锌钢板钎焊时可防止锌层的破坏及锌的蒸发, 钎缝耐腐蚀, 生产效率高。

根据电极采用的材料不同, 电弧钎焊分为熔化极惰性气体保护电弧钎焊 (MIG 钎焊)、钨极惰性气体保护电弧钎焊 (TIG 钎焊)、脉冲熔化极/非熔化极惰性气体保护电弧钎焊及等离子弧钎焊。

对于 TIG/MIG 钎焊, 电极接正极, 母材接负极, 因其特有的“阴极雾化”作用, 能破碎和清洁钎缝表面的氧化膜; 电极接负极时, 等离子弧柱的热活化和热蒸发作用, 使加热区得到净化, 所以电弧钎焊不需要用钎剂, 无钎剂腐蚀作用, 不需要焊后清洗。

MIG 钎焊中采用脉冲电流是取得低热输入最适宜的方式, 并采用一脉一滴的熔滴过渡方式。钎焊过程中无飞溅, 电弧十分稳定。采用脉冲 MIG 钎焊, 因接头能够熔敷足够多的钎料, 而这个部位的热输入却很小, 所以对减小变形效果显著。

电弧钎焊要求热输入不能过大, 否则会造成焊件局部熔化而不能形成钎焊接头。故采用较低的热输入是获得良好钎焊接头的必要条件。因此钎焊过程中必须严格执行工艺规范。

电弧钎焊作为一种新型的钎焊工艺, 由于其显著优点已在生产中获得了很多应用。在国内, 一汽集团在 20 世纪 90 年代初即开展了电弧钎焊工艺的研究, 并很快用于轻型车、涂装线制造等生产中; 奥迪 A6、上海别克已使用 MIG 钎焊方法焊接镀锌钢板; 上海大众帕萨特在 2000 年已大量采用了该工艺。德国、美国、英国、日本、瑞士、荷兰、意大利等国的汽车工业的部件制造及电器制造上, 都已经采用了电弧钎焊方法。

参考文献

- [1] 邹僊. 钎焊 [M]. 修订本. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [2] 赵越. 钎焊技术及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [3] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册: 第 1 卷 焊接方法及设备 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [4] 史耀武. 中国材料工程大典: 第 22 卷 材料焊接工程 (上) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [5] 王芳. 火焰钎焊工艺在空调管路加工中的应用和研究 [J]. 机电工程技术, 2006, 35 (7): 68-69
- [6] 贾志华, 郑晶, 王轶, 等. AgW50 触头与紫铜的电阻钎焊工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2008, 37 (23): 98-99.
- [7] 邹慧, 马祥, 王志平, 等. 感应钎焊修复 PW4000 发动机管件及其性能 [J]. 焊接技术, 2010, 39 (2): 25-28.
- [8] 韩宗杰, 薛松柏, 王俭辛. 激光钎焊及其在表面组装技术中的应用 [J]. 电焊机, 2008, 38 (9): 27-29.
- [9] 林平. 激光钎焊在汽车行业的焊接应用 [J]. 电焊机, 2010, 140 (5): 39-43.
- [10] 梁文生. ATR 三防机箱盐浴浸渍钎焊工艺研究 [J]. 金属加工 (热加工), 2009 (4): 49-51.

第 3 章 钎焊材料简介

本章根据各种钎焊材料（钎料和钎剂）的特点及分类原则，对钎焊材料的选取原则进行了较为详细的介绍，同时介绍钎剂的去膜机理，还对各种钎焊材料的应用范围做了说明。

3.1 钎料和钎剂概述

钎焊过程涉及复杂的物理、化学、冶金过程，对钎焊接头的评价也涉及众多的质量要素。钎焊接头设计的流程示意如图 3-3-1 所示，其中列出整个钎焊过程中必须考虑的所有重要因素。从图可见，母材金属、钎料和钎剂的选择匹配是设计一个高质量钎焊接头的起点，对整个钎焊过程和工艺质量起着决定性作用。

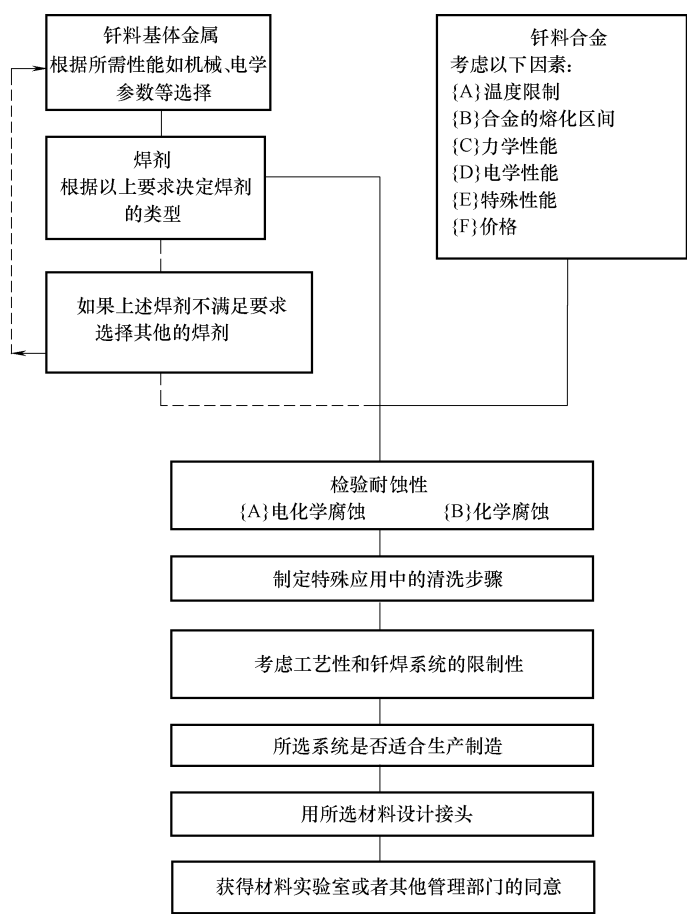


图 3-3-1 钎焊接头设计流程图

作为钎焊中材料体系的三个要素：母材、钎料合金和钎剂，任何高质量的钎焊接头都需要三者在物理、化学和冶金性能上的良好匹配。因为钎料和钎剂的选择跟母材金属的性能特征密切相关，所以在进行一个钎焊接头的设计之前，必须首先深入了解母材金属的特性、应用场合和工艺目标。

常用金属的钎焊性能特征参数见表 3-3-1，这些金属分为正常条件下钎焊、特殊条件下钎焊、通常不用于钎焊三大类。

表 3-3-1 常用金属的钎焊性能

序号	金属	电动势/V	钎焊性	电阻率/ ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	密度/ (g/cm^3)	弹性模量/ ($\times 10^3 \text{MPa}$)	布氏硬度 HBW
1	镁	2.34	2	4.46 $\uparrow$	651	1.74	45.7	30
2	铍	1.70	3	106.8 $\S$	1284	1.82	32.3	60 ~ 125
3	铝	1.67	2	2.655 $\uparrow$	657	2.70	70.3	15
4	锌	0.76	1	5.916 $\uparrow$	419	7.14	84.4	31
5	铬	0.71	3	6.24 $\uparrow$	1550	7.148	253.1	108
6	铁	0.44	1	9.71 $\uparrow$	1535	7.87	200.4	60
7	镉	0.40	1	3.43 $\S$	321	8.65	21.3	35
8	铟	0.38	1	8.37 $\S$	156	7.31	11.0	0.9
9	钴	0.28	3	6.24 $\uparrow$	1490	8.9	211.0	124
10	镍	0.25	1	6.84 $\uparrow$	1452	8.9	211.0	110
11	锡	0.14	1	11.5 $\uparrow$	232	7.30	42.8	5.2
12	铅 ^L	0.13	1	20.65 $\uparrow$	327	11.36	18.3	3.9
13	氢	0.00	—	—	—	—	—	—
14	不锈钢	-0.09	2	74.0 $\uparrow$	1399	8.02	203.9	200
15	铈	-0.10	1	39.0 $\S$	630	6.62	79.5	42
16	铋	-0.20	1	119 $\S$	271	9.80	32.3	4.7
17	硅	-0.26	3	$1 \times 10^3 \S$	1420	2.33	112.5	240
18	铜	-0.34	1	1.726 $\&$	1082	8.94	112.5	42
19	钢	-0.58	1	18.0 $\uparrow$	1516	7.7	—	175
20	银	-0.80	1	1.59 $\uparrow$	961	10.5	77.3	95
21	钨	-0.82	1	10.8 $\uparrow$	1554	12.0	119.5	35
22	铂	-0.86	1	9.83 $\S$	1773	21.45	147.7	37
23	金	-1.68	1	2.19 $\S$	1063	19.3	84.4	28

注：“钎焊性”一栏中，1 = 正常条件下钎焊，2 = 特殊条件下钎焊，3 = 通常不用于钎焊。 $\uparrow$ —20 $^{\circ}\text{C}$ ， $\S$ —0 $^{\circ}\text{C}$ ， $\&$ —23 $^{\circ}\text{C}$ 。

3.1.1 钎料的分类和性能

钎料是形成钎焊接头的填充金属，钎焊接头的质量在很大程度上取决于钎料。钎料应该具有合适的熔点、良好的润湿性和填缝能力，能与母材相互扩散，还应具有一定的力学性能和物理、化学性能，以满足接头的使用性能要求。

常用的钎料一般根据熔点分成两类。一类是硬钎料，熔点在 450 $^{\circ}\text{C}$ 以上，有铜基钎料、银钎料、铝基钎料、镍基钎料等，通常把用这类钎料进行的钎焊称为硬钎焊。硬钎焊接头强度较高，适于受力较大或工作温度较高的焊件，如结构件等。熔点高于 950 $^{\circ}\text{C}$ 的常称为高温钎料。另一类是软钎料，熔点在 450 $^{\circ}\text{C}$ 以下，应用最广泛的软钎料是锡基钎料，多数软钎料适合的焊接温度为 200 ~ 400 $^{\circ}\text{C}$ ，通常把用这类钎料进行的钎焊称为软钎焊。软钎焊接头强度较低，适于受力不大或工作温度较低的焊件，典型的电子产业中的应用。常用的各类钎料的熔化温度见表 3-3-2。

钎料通常都是二元或多元合金，一来降低钎料的熔化温度，二来可生成有利的金属间化合物以提高接头强度。理想的钎料是母材合金主元素的共晶型合金。

对于特定的母材金属材料，钎焊接头的质量首先取决于所用的钎料。选择钎料时通常要考虑下列因素。

1) 钎料与母材的匹配：所选用的钎料要有适当的熔化温度，对母材有良好的润湿性，与母材的冶金反应最好不会产生脆性的金属间化合物。

表 3-3-2 合金钎料的熔化温度范围

软钎料		硬钎料		软钎料		硬钎料	
组成	熔化温度/℃	组成	熔化温度/℃	组成	熔化温度/℃	组成	熔化温度/℃
Zn-Al 钎料	380 ~ 500	镍基钎料	780 ~ 1200	Sn-Ag 钎料	210 ~ 250	黄铜钎料	820 ~ 1050
Cd-Z 钎料	260 ~ 350	钼钎料	800 ~ 1230	Sn-Pb 钎料	180 ~ 280	铜磷钎料	700 ~ 900
Pb-A 钎料	300 ~ 500	金基钎料	900 ~ 1020	Bi 基钎料	40 ~ 180	银钎料	600 ~ 970
Sn-Zn 钎料	190 ~ 380	铜钎料	1080 ~ 1130	In 基钎料	30 ~ 140	铅基钎料	460 ~ 630

2) 采用的焊接方法：不同的钎焊方法对钎料性能要求不同。火焰钎焊需要钎料和母材的熔点差较大，避免母材局部过热熔化；电阻钎焊需要钎料的电阻率较大，以提高加热效率；炉中钎焊需要钎料中易挥发成分较少，避免较长钎焊时间内成分挥发造成接头性能下降；激光钎焊的局限性较小，但钎料熔态时间短，良好的润湿能力和扩散能力有助于提高钎焊质量。

3) 对焊接接头的性能要求：不同的产品在不同的服役条件下对焊接接头性能要求不同，譬如电子产业、制冷产业、饰品产业等。通常的性能要求有导电性、导热性、工作温度、力学性能、密封性、抗氧化性、耐蚀性等，要根据使用条件决定其关键性能需求。

4) 经济性与其他要求：钎料满足各种性能要求后，还要考虑经济性，尽可能不用或少用稀有金属和贵金属，降低成本。

3.1.2 钎剂的分类和性能

钎剂是钎焊过程中使用的熔剂，与钎料配合使用，通常是保证钎焊过程顺利进行和获得致密接头不可缺少的。钎剂的作用是清除熔融钎料和母材表面的氧化物，保护钎料及母材表面不被继续氧化，改善钎料对母材的润湿性，促进界面活化，使其能顺利地实现钎焊过程。钎剂与钎料的合理选用对钎焊接头的质量起关键作用。对钎剂的基本要求有以下方面。

1) 钎剂的熔点和最低活性温度比钎料低，在活性温度范围内有足够的流动性。在钎料熔化之前钎剂就应熔化并开始起作用，去除钎缝间隙和钎料表面的氧化膜，为液态钎料的铺展润湿创造条件。

2) 应具有良好的热稳定性，使钎剂在加热过程中保持其成分和作用稳定不变。一般说来钎剂应具有不小于 100℃ 的热稳定温度范围。

3) 能很好地溶解或破坏被钎焊金属和钎料表面的氧化膜。钎剂中各组分的汽化（蒸发）温度比钎焊温度高，以避免钎剂挥发而丧失作用。

4) 在钎焊温度范围内钎剂应粘度小、流动性好，能很好地润湿钎焊金属、减少液态钎料的界面张力。

5) 熔融钎剂及清除氧化膜后的生成物密度应较小，有利于上浮，呈薄膜层均匀地覆盖在钎焊金属表面，有效地隔绝空气，促进钎料润湿和铺展，不致滞留在钎缝中形成夹渣。

6) 熔融钎剂残渣不应对于钎焊金属和钎缝有强烈的腐蚀作用，钎剂挥发物的毒性小。

钎剂的组成物质主要取决于所要清除氧化物的物理化学性质。钎剂一般由活化剂、熔剂、表面活性剂和特殊成分组成。特殊成分包括缓蚀剂、防氧化剂、成膜剂等。理想的钎剂除化学活性外，还要具有良好的热稳定性、粘附力、扩展力、电解活性、环境稳定性、化学官能团及其反应特性、流变特性、对通用清洗溶液和设备的适应性等，这就对钎剂配方提出了较高要求。构成钎剂的组成物质可以是单一组元（如硼砂、氯化锌等），也可以是多组元系统。多组元系统通常由基体组元、去膜组元和活性组元组成。钎剂的分类与钎料分类相适应，通常分为软钎剂、硬钎剂、铝用钎剂等，分别适用于不同的场合，此外还有气体钎剂。

随着 RoHS 和 WEEE 指令的实行，无铅化对钎剂的性能提出了更高的要求，钎剂已由传统的松

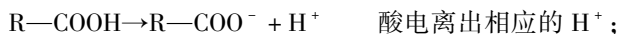
香型向无卤、无松香、免清洗、低固含量方向发展,其组成也随之发生了相应的变化,各组分的相互作用,使钎剂的性能更加优良。下面对钎剂中各成分的作用机理作一简单介绍。

1. 活化剂

活化剂的主要作用是在焊接温度下去除焊盘和焊料表面的氧化物,并形成保护层,防止基体的再次氧化,从而提高钎料和焊盘之间的润湿性。活化剂的成分一般为氢气、无机盐、酸类和胺类及其复配组合物。就目前广泛使用的锡膏来看,无论是有铅还是无铅系列,活化剂均可分为含卤和无卤两类,欧美系锡膏偏重于前者,而日系锡膏则偏重于后者。含卤的锡膏通常活性较强,且它的活性和腐蚀性联系在一起,可以说活性越强,焊后残留物的腐蚀性也越强。但不管是含卤还是无卤的锡膏,其中活化剂的主要成分均为有机酸,因为有机酸有最小的离子污染残留物和高的表面抗绝缘性。常用的是脂肪族二元酸、芳香酸、氨基酸或柠檬酸。由于钎焊温度是一个区间温度,单一有机酸的活性温度通常是一个点,当温度低于活性温度时有机酸呈惰性;只有在活性温度以上,有机酸中的活性才能被激活, H^+ 离子大量电离,在很短的时间内就能迅速去除钎料和母材表面的氧化膜,保证钎料熔化后两种金属可以直接接触反应。由于这种作用时间很短,单一的活化剂通常无法适应这么大的钎焊区间范围,故一般考虑将该钎焊稳定范围内几种分解温度不同的有机酸进行复配。

另外,为了调节焊剂的酸度值,有机酸中常添加一定量的有机胺,进行酸碱的复配处理。有机胺也可以改善焊接效果,因为其本身含有的氨基- NH_2 具有活性,并且在焊接后还能同多余的酸中和,以减小焊后腐蚀。在此为解决钎焊性与腐蚀性的矛盾,一般对活性成分采取了特殊的微胶囊化处理技术,即利用成膜剂将复配后的活性物质进行包覆,这样在室温状态下活性物质表现出极好的惰性,从而较好地解决了储存的问题。

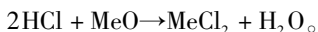
在钎焊过程中,不论是何种酸碱复配的活性物质,在初始加热时首先均从被包覆的成膜剂中释放出来,并很快发生分解生成相应的酸和碱,然后迅速与焊料和母材表面的氧化物发生一系列的化学反应:



式中, $R-COOH$ 代表 R 酸; $MNH_2 \cdot HX$ 代表 M 胺。

反应生成的 MeX_2 及金属离子的羧酸盐溶解在溶剂中,与清洁的金属表面分离开来。随着温度的升高钎料熔化后通过表面活性剂的帮助,很快润湿和铺展在已除去氧化膜而裸露的铜层表面,形成冶金结合,生成牢固和稳定的 Cu_6Sn_5 、 Cu_3Sn 等合金层,从而顺利完成钎焊。

含卤钎剂的钎焊机理与无卤钎剂并无太大差别,所不同的是在原材料上含卤钎剂添加了微量的长链共价键卤化物作为活性剂。这样在回流温度下,含共价键的卤化物快速断裂分解,生成卤盐与氧化膜发生化学作用以完成钎焊,具体反应机理如下:



因卤盐通常要比有机酸的活性强得多,并且在室温下的活性也很强,直接加入会影响钎剂的储藏和使用时间,所以在使用时大都通过间接方法得到。

松香 (Colophony) 用分子式表示为 $C_{19}H_{29}COOH$, 由于它含有羧基,使得它在一定的温度下,有一定的助焊作用;同时松香是一种大分子多环化合物,因此它具有一定的成膜性,在焊接过程中起传递热量和覆盖作用,能保护去除氧化膜后的金属不再重新被氧化。

2. 表面活性剂

表面活性剂的主要作用是降低钎剂的表面张力,增加钎剂对钎料和焊盘的润湿性。因为钎剂在

加热过程中呈液态，任何液体都存在表面张力，使液体达到最小表面积而呈球状，从而不润湿钎料和母材表面。因此通过添加极性比较大的表面活性物质，使钎剂分子内部具有较大的极性来减小钎剂表面张力，促使钎剂与钎料和被钎焊表面产生范德华力或化学作用力而接触良好。表面活性剂可以是非离子型、阴离子型、阳离子型、两性及氟炭类表面活性剂。钎剂中最常使用 OP 系列作为表面活性剂，它属于非离子型表面活性剂，可以增进钎剂对被钎焊材料的均匀润湿作用，使得焊点和钎缝规整、饱满。表面活性剂因其特殊的结构能有效地降低熔融钎料表面张力，促进钎料的润湿，但钎焊后会留下吸湿性残留物，用量不能过多。

3.2 软钎料

3.2.1 锡基和铅基钎料

软钎料中应用最广泛的是锡铅钎料。锡铅二元合金相图如图 3-3-2 所示，是典型的共晶型合金。锡铅钎料主要以锡铅两种元素为主，加入少量其他合金元素组成一系列锡铅合金钎料，熔点低，电阻率低，耐蚀性好，对纯铜、铜合金、碳素钢、不锈钢有良好的润湿性。锡的质量分数超过 50% 的锡铅钎料主要用于电气、电子工业、餐具制品等，锡的质量分数低于 40% 的锡铅钎料主要用于灯泡、换热器、汽车水箱、铅管等场合。常用的锡铅钎料的化学成分见表 3-3-3、表 3-3-4，物理性能见表 3-3-5。

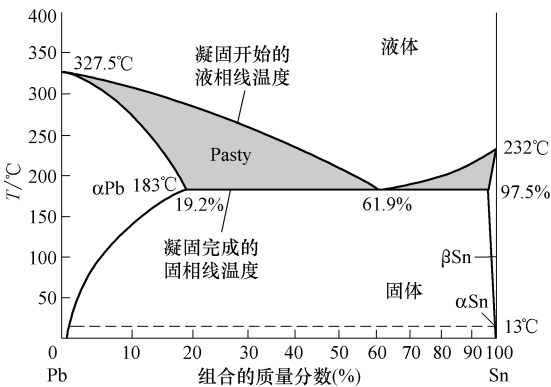


图 3-3-2 锡铅二元合金相图

表 3-3-3 锡铅 A 级钎料的化学成分

合金名称	牌号	主要成分(质量分数,%)				杂质≤(质量分数,%)							
		Sn	Pb	Sb	其他	Sb	Cu	Bi	As	Fe	S	Zn	Al
95A 锡铅焊料	HLSn95PbA	94~96	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
90A 锡铅焊料	HLSn90PbA	89~91	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
65A 锡铅焊料	HLSn65PbA	64~66	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
63A 锡铅焊料	HLSn63PbA	62~64	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
60A 锡铅焊料	HLSn60PbA	69~61	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
60A 锡铅锑焊料	HLSn60PbSbA	59~61	余量	0.3~0.8	—	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
55A 锡铅焊料	HLSn55PbA	54~56	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
50A 锡铅焊料	HLSn50PbA	49~51	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
50A 锡铅锑焊料	HLSn50PbSbA	49~51	余量	0.3~0.8	—	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
45A 锡铅焊料	HLSn45PbA	44~46	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
40A 锡铅焊料	HLSn40PbA	39~41	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
40A 锡铅锑焊料	HLSn40PbSbA	39~41	余量	1.5~3.0	—	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
35A 锡铅焊料	HLSn35PbA	34~36	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
30A 锡铅焊料	HLSn30PbA	29~31	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
30A 锡铅锑焊料	HLSn30PbSbA	29~31	余量	1.5~2.0	—	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005

(续)

合金名称	牌号	主要成分(质量分数,%)				杂质≤(质量分数,%)							
		Sn	Pb	Sb	其他	Sb	Cu	Bi	As	Fe	S	Zn	Al
25A 锡铅锑焊料	HLSn25PbSbA	24~26	余量	1.5~2.0	—	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
20A 锡铅焊料	HLSn20PbA	19~21	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
18A 锡铅锑焊料	HLSn18PbSbA	17~19	余量	1.5~2.0	—	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
10A 锡铅焊料	HLSn10PbA	9~11	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
5A 锡铅焊料	HLSn5PbA	4~6	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
4A 锡铅锑焊料	HLSn4PbSbA	3~5	余量	5~6	—	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02		0.005
2A 锡铅焊料	HLSn2PbA	1~3	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
50A 锡铅镉焊料	HLSn50PbCdA	49~51	余量	—	Cd: 17~19	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
5A 锡铅银焊料	HLSn5PbAgA	4~6	余量	—	Ag: 1~2	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
63A 锡铅银焊料	HLSn63PbAgA	62~64	余量	—	Ag: 1.5~2.5	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
38A 锡铅锌焊料	HLSn38PbZnA	37~39	余量	0.5~1.0	Zn: 4~5 Cu: 0.02~0.1	—	—	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
40A 抗氧化锡铅银焊料	HLKSn40PbSnA	39~41	余量	1.5~2.0	P: 0.001~0.004 Ga: 0.001~0.004	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005
60A 抗氧化锡铅银焊料	HLKSn60PbSnA	59~62	余量	0.3~0.8	P: 0.001~0.004 Ga: 0.001~0.004	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005

表 3-3-4 锡铅 B 级钎料的化学成分

合金名称	牌号	主要成分(质量分数,%)				杂质≤(质量分数,%)								
		Sn	Pb	Sb	其他	Sb	Cu	Bi	As	Fe	S	Zn	Al	Ag
95B 锡铅焊料	HLSn95PbB	93.5~96	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
90B 锡铅焊料	HLSn90PbB	88.9~91	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
65B 锡铅焊料	HLSn65PbB	63.5~66	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
63B 锡铅焊料	HLSn63PbB	61.5~64	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
60B 锡铅焊料	HLSn60PbB	58.5~61	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
60B 锡铅锑焊料	HLSn60PbSbB	58.5~61	余量	0.3~0.8	—	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
55B 锡铅焊料	HLSn55PbB	53.5~56	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—

(续)

合金名称	牌号	主要成分(质量分数,%)				杂质≤(质量分数,%)								
		Sn	Pb	Sb	其他	Sb	Cu	Bi	As	Fe	S	Zn	Al	Ag
50B 锡铅焊料	HLSn50PbB	48.5 ~ 51	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
50B 锡铅锑焊料	HLSn50PbSbB	48.5 ~ 51	余量	0.3 ~ 0.8	—	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
45B 锡铅焊料	HLSn45PbB	43.5 ~ 46	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
40B 锡铅焊料	HLSn40PbB	38.5 ~ 41	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
40B 锡铅锑焊料	HLSn40PbSbB	38.5 ~ 41	余量	1.5 ~ 3.0	—	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
35B 锡铅焊料	HLSn35PbB	33.5 ~ 36	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
30B 锡铅焊料	HLSn30PbB	28.5 ~ 31	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
30B 锡铅锑焊料	HLSn30PbSbB	28.5 ~ 31	余量	1.5 ~ 2.0	—	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
25B 锡铅锑焊料	HLSn25PbSbB	23.5 ~ 26	余量	1.5 ~ 2.0	—	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
20B 锡铅焊料	HLSn20PbB	18.5 ~ 21	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
18B 锡铅锑焊料	HLSn18PbSbB	16.5 ~ 19	余量	1.5 ~ 2.0	—	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
10B 锡铅焊料	HLSn10PbB	8.5 ~ 11	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
5B 锡铅焊料	HLSn5PbB	3.5 ~ 6	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
4B 锡铅锑焊料	HLSn4PbSbB	2.5 ~ 5	余量	5 ~ 6	—	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
2B 锡铅焊料	HLSn2PbB	0.5 ~ 3	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
50B 锡铅镉焊料	HLSn50PbCdB	48.5 ~ 51	余量	—	Cd: 17 ~ 19	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
5B 锡铅银焊料	HLSn5PbBgB	3.5 ~ 6	余量	—	Ag:1 ~ 2	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
63B 锡铅银焊料	HLSn63PbBgB	61.5 ~ 64	余量	—	Ag: 1.5 ~ 2.5	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
38B 锡铅锌焊料	HLSn38PbZnB	36.5 ~ 39	余量	0.5 ~ 1.0	Zn:4 ~ 5 Cu: 0.02 ~ 0.1	—	—	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	0.01
40B 抗氧化锡铅银焊料	HLKSn40PbSnB	38.5 ~ 41	余量	1.5 ~ 2.0	P: 0.001 ~ 0.004 Ca: 0.001 ~ 0.004	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
60B 抗氧化锡铅银焊料	HLKSn60PbSnB	58.5 ~ 61	余量	0.3 ~ 0.8	P: 0.001 ~ 0.004 Ca: 0.001 ~ 0.004	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—

表 3-3-5 锡铅钎料的物理性能

牌号	固相线(约)/℃	液相线(约)/℃	电阻率(约)/[Ω·mm/ω]
HLSn95Pb	183	224	—
HLSn90Pb	183	215	—
HLSn65Pb	183	186	0.122
HLSn63Pb	183	183	—

(续)

牌号	固相线(约)/℃	液相线(约)/℃	电阻率(约)/[Ω·mm/ω]
HLSn60Pb、HLSn63PbSb、HLKSn40PbSb	183	190	0.145
HLSn55Pb	183	203	0.160
HLSn50Pb、HLSn50PbSb	183	215	1.181
HLSn45Pb	183	227	—
HLSn40Pb、HLSn40PbSb、HLKSn40PbSb	183	238	0.170
HLSn35Pb	183	248	—
HLSn30Pb、HLSn30PbSb	183	258	0.182
HLSn25PbSb	183	260	0.196
HLSn20Pb、HLSn18PbSb	183	279	0.220
HLSn10Pb	268	301	0.198
HLSn5Pb	300	314	—
HLSn4PbSb	305	317	0.198
HLSn2Pb	316	322	—
HLSn3550PbCd	145	145	—
HLSn5PbAg	296	301	—
HLSn63PbAg	183	183	0.120
HLSn38PbZnSb	170	246	0.146

HLSn4PbSb 的固相线较高，熔化间隔小，润湿性和铺展性比锡含量高的钎料差，用于工作温度较高的场合（如汽车散热器等）以及焊件表面预涂敷锡的部件。

HLSn10Pb 和 HLSn18PbSb 钎料的固、液相线均有所下降，但熔化温度间隔增大。为了防止热撕裂，必须在钎料凝固前防止接头的位移，使用场合与 HLSn4PbSb 钎料相似。

HLSn30PbSb、HLSn40PbSb、HLSn40Pb、HLSn50Pb、HLSn50PbSb 钎料的固相线均为 183℃，但液相线较低，熔化温度间隔相对缩小，钎焊比较容易；且由于含锡量的提高，钎料的润湿性和铺展性进一步提高，成为工艺性、强度和经济性等都属于最佳的钎料。其中 HLSn40Pb 和 HLSn40PbSb 成为最通用的锡铅钎料，广泛用于铜和铜合金的钎焊，如散热器、管道、电气接头、家用制品、发动机部件等。

HLSn60Pb、HLSn63Pb 是锡铅钎料中熔化温度最低的一类，它具有优越的工艺性能，特别适用于对温度很苛刻的场合，最常用于电子器件的手工软钎焊、波峰焊、热熔焊和浸渍钎焊等，以及对温度很敏感的材料，如经淬火和时效处理的铜合金等。

HLSn63PbAg 钎料含 Ag 的质量分数为 2%，其目的—是减轻母材镀银层的溶蚀，二是可以提高钎料的抗蠕变和疲劳性能，更好地防止钎焊接头失效，以用于重要场合。

HLKSn60PbSb 是抗氧化钎料。钎料中的镓起着表面活性作用，防止或减轻熔融锡铅钎料表面的氧化，特别适用于波峰焊和浸渍钎焊。

铅基钎料中通常添加 Ag 或 Sn，其化学成分及性能见表 3-3-6。铅银钎料的固相线温度较高，耐热性优于锡铅钎料，适用于要求在中温下具有一定强度的零件的钎焊。铅银钎料的润湿性差，加入少量的锡可改善它的润湿性。用铅基钎料钎焊的铜或黄铜接头如果在湿热环境下工作，表面必须涂敷防护涂料，防止钎焊接头被腐蚀。

表 3-3-6 铅基钎料的化学成分和性能

钎料	化学成分(质量分数,%)			熔化温度 /℃	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	电阻率 /(Ω·mm ² /m)
	Pb	Ag	Sn				
HLSn60Pb	97.0	3.0	—	304~305	30.4	4.5	0.2
HLSn63Pb	97.5	1.5	1.0	310~310	—	—	—
HLSn65Pb	92.0	2.5	5.5	287~296	—	—	—
HLSn68Pb	83.5	1.5	15.0	265~270	—	—	—

3.2.2 镉基、锌基和金基钎料

1. 镉基钎料

镉基钎料的化学成分和性能见表 3-3-7。镉基钎料是软钎料中耐热性最好的钎料，并具有较好的耐蚀性。HL503（95Cd－5Ag）钎料在温度高达 218℃ 时仍能保持相当的强度，有的铜钎焊接头可承受 250℃ 的工作温度。镉基钎料添加锌的目的是降低钎料的熔化温度以及减轻熔融钎料表面的氧化，并适当提高钎料的强度。用镉基钎料钎焊铜和铜合金时，由于镉与铜的作用，在界面上极易形成脆性铜镉化合物相，所以必须采用快速加热的钎焊方法，如电阻钎焊，并且必须防止过热以及要缩短钎焊保温时间，以减薄界面的脆性相层。镉蒸气有毒，对人类健康危害极大，必须注意钎焊时的通风。

表 3-3-7 镉基钎料的化学成分和性能

钎料	化学成分(质量分数,%)			熔化温度 /℃	抗拉强度 /MPa
	Cd	Ag	Zn		
HL503	95	5	—	338 ~ 393	112.8
HLAgCd96-1	96	3	1	300 ~ 325	110.8
Cd79ZnAg	79	5	16	270 ~ 285	200
HL508	92	5	3	320 ~ 360	—

2. 锌基钎料

锌基钎料是以锌为基体的钎料，通常有锌锡钎料和锌铝钎料。锌基钎料主要用于钎焊铝及铝合金，也可用于钎焊铜及铜合金。大部分锌基钎料的强度低、延性差。典型的中国锌锡钎料的牌号是 HL501，其合金成分（质量分数）为：Zn56% ~ 60%，Sn38% ~ 42%，Cu1.5% ~ 2.5%。固相线温度 200℃，液相线温度 350℃。由于这种钎料结晶温度间隔大，所以特别适合于铝和铝合金的钎焊。典型的中国锌铝钎料的牌号是 HL505，其合金成分（质量分数）为：Zn70% ~ 75%，Al25% ~ 30%。固相线温度 430℃，液相线温度 500℃。该钎料适用于各种铝和铝合金的火焰钎焊，具有良好的流动性和充满间隙的能力，接头的耐蚀性较好。锌基钎料的化学成分、熔化温度范围和用途见表 3-3-8。

表 3-3-8 锌基钎料的化学成分、熔化温度范围和用途

钎料牌号	化学成分(质量分数,%)					熔化温度 范围/℃	用 途
	Zn	Al	Sn	Cu	其他		
Zn95Al	95	5	—	—	—	382	用于钎焊铝和铝合金以及铝铜接头、钎焊接头具有较好的耐蚀性
Zn89AlCu	89	7	—	4	—	377	用于钎焊铝和铝合金以及铝铜接头、钎焊接头具有较好的耐蚀性
Zn86AlCuBi	86	6.7	2	3.8	Bi1.5	304 ~ 350	对铜和铜合金的湿润性较好,主要用于钎焊铜和铜合金
HL505	72.5	27.5	—	—	—	430 ~ 500	用于钎焊固相线温度低的铝合金,如 2A12 等。接头耐蚀性是锌基钎料中最好的
HL501	58	—	40	2	—	200 ~ 350	用于铝的钎焊,钎焊接头具有中等耐蚀性

3. 金基钎料

以前几乎全部用来钎焊首饰，近年来，随着电子工业、核工业、航空和航天工业的发展，金基钎料也扩大了它的应用范畴。当钎焊接头要求抗氧化、高温热强度高时，常用此类钎料进行钎焊。金基钎料的化学成分和熔化温度见表 3-3-9。它们对多种金属都有较好的润湿性和铺展性，常用于钎焊铜、镍、不锈钢等。由于此类钎料同母材金属很少发生反应（但 Cu 除外），适宜钎焊薄壁零件。常用的金基钎料有

纯金、金铜、金镍等二元合金，以及金铜钨、金银铜、金锆铜、金镍铜等三元合金。

表 3-3-9 金基钎料的化学成分和熔化温度

编号	化学成分(质量分数,%)						熔化温度/℃	
	Au	Cu	Ni	Ag	Pb	其他	固相线	液相线
1	100	—	—	—	—	—	1063	1063
2	94	6	—	—	—	—	965	970
3	81.2	15.5	3	—	—	—	—	≈900
4	80	20	—	—	—	—	910	910
5	80	19	—	—	—	1.0Fe	905	910
6	75	25	—	—	—	—	910	914
7	62.5	37.5	—	—	—	—	930	940
8	50	50	—	—	—	—	955	970
9	40	60	—	—	—	—	975	995
10	37.5	62.5	—	—	—	—	980	1000
11	35	62	—	—	—	—	973	1029
12	35	65	—	—	—	—	970	1005
13	30	70	—	—	—	—	995	1020
14	20	80	—	—	—	—	1018	1040
15	70	—	—	30	—	—	1000	1040
16	60	20	—	20	—	—	—	≈845
17	82.5	—	17.5	—	8	—	950	950
18	68	22	8.9	—	13	1.0Cr 0.1B	960	980
19	75	—	25	—	25	—	950	990
20	72	—	22	—	8	6Cr	975	1038
21	65	—	35	—	25	—	950	1070
22	92	—	—	—	—	—	1180	1230
23	87	—	—	—	—	—	1260	1300
24	75	—	—	—	—	—	1375	1400
25	70	—	22	—	—	—	—	≈1045
26	60	—	25	—	—	—	—	≈1121

金与铜形成连续固溶体，而且固相线与液相线的间隔都很小，所以 Au-Cu 钎料的塑性很好，可制成各种形状。根据不同比例，可配成各种不同熔点的 Au-Cu 钎料，但随铜含量的增加，耐蚀性逐渐降低。Au-Cu 钎料的蒸气压低，合金元素不易挥发，特别适用于电真空器件的钎焊。Au-Cu 钎料的特点如下：

- 1) 对铜、镍、铁、钴、钼、钽、铌、钨及其合金具有优良的润湿性。
- 2) 对上述金属和合金的相互作用小，不会发生溶蚀等缺陷，可以钎焊薄件。
- 3) 无易挥发组分，可钎焊在高温中于真空下工作的部件。钎料不含能形成难熔氧化物的组分，在保护气氛或真空中钎焊时对气氛纯度和真空度的要求不高。
- 4) 耐蚀性好，尤其是含金量高的钎料。
- 5) 延性好，容易加工成丝、片、箔等形状，使用方便。

金镍钎料具有金铜钎料的全部优点，尤其在高温强度和抗氧化性方面比金铜钎料好得多。由 Au-Ni 相图可知，金中加入一定量的镍，能使其熔点低于金的熔点。当镍的质量分数为 17.5% 时，其熔点最低（955℃）。此时，液相线与固相线几乎重合，熔化冷却后不易发生偏析现象。所以成分为 Au-17.5Ni 的合金是一种很理想的钎料，它熔化温度合适，在钎焊可伐合金、不锈钢时不会因温度过高发生晶粒长大等现象。它和成分与其非常接近的 Au-18Ni 钎料，是 Au-Ni 系钎料中钎焊工艺性能和钎焊接头综合性能最好、应用最广的钎料。其突出的优点是它对多种金属都有良好的润湿

性和流布性能，其钎焊接头有很高的强度、优良的耐蚀性和较好的高温抗蠕变性能。这类钎料的缺点是加工性能不好。

AuSn20 钎料由于对镀金层无溶蚀、对镀金层润湿性优良和良好的导热性、高的接头强度、耐热冲击和耐多种物质的腐蚀以及较低的熔点，被广泛用于高可靠镀金器件的无钎剂钎焊和气密封装。

3.2.3 低熔点钎料

典型的低熔点钎料有铋基、钢基、镓基等。铋的熔点是 271℃，它能与很多金属形成低熔点共晶。铋基钎料脆，对铜、钢的润湿性差。钎焊前应对金属预先镀锌、银、锡，适用于热敏电子元、器件的制造。钢的熔点是 156.4℃，能与锡、铅、锌、镉、铋等金属形成低熔点共晶，这种钎料在碱性介质中耐蚀性很强，能很好地润湿金属与非金属。钢基钎料广泛应用于电真空器件、玻璃、陶瓷和低温超导器件的钎焊。表 3-3-10 和表 3-3-11 分别列出了铋基和镓基钎料的化学成分和熔化温度。可见，尤其是镓基钎料，熔化温度不超过 30℃，适用于电力电子行业中某些特殊用途以及消防设备等。

表 3-3-10 铋基钎料的化学成分和熔化温度

钎料牌号	化学成分(质量分数,%)					液相线温度/℃
	Bi	Pb	Sn	Cd	In	
Bi60Cd	60	—	—	40	—	144
Bi59SnPb	59	15	26	—	—	114
Bi57Sn	57	—	43	—	—	138.5
Bi55Sn	55	45	—	—	—	124
Bi50PbSn	60	25	25	—	—	94
Bi49InPbSn	49	18	12	—	21	58
Bi32PbInSn	32	22	10.8	8.2	18	46

表 3-3-11 镓基钎料的化学成分和熔化温度

钎料牌号	化学成分(质量分数,%)						液相线温度/℃
	Ga	In	Sn	Zn	Cd	Mg	
Ga100	100	—	—	—	—	—	29.8
Ga95Zn	95	—	—	5	—	—	24-25
Ga92Sn	92	—	8	—	—	—	20-21
Ga82SnZn	82	—	12	6	—	—	17
Ga76In	76	24	—	—	—	—	18
GaInZn	67	29	—	4	—	—	13
Ga55InSnCdMgZn	55	25	11	Zr1	4	4	10.6

3.3 硬钎料

3.3.1 铝基钎料

铝基钎料主要以铝硅合金为基，还可加入铜、锌、镁等元素以满足工艺性能的要求。铝基钎料在铝、钛等合金焊接中应用较多，如铝基钎料非常适宜钎焊钛合金散热器、钛蜂窝和层板结构。因为铝基钎料钎焊温度低，远低于钛合金 β 转变温度，基体不会软化，对固溶时效状态钛合金只要钎焊温度选择合适可以保持其性能不变，同时大大简化钎焊夹具材料及结构的选择，提高其使用寿命。此外与钛基体相互作用小，无明显溶蚀和扩散，钛不易被钎料饱和而形成脆性的金属间化合

物，同时钎焊接头耐蚀性优于银钎料。

铝基钎料适用于火焰钎焊、炉中钎焊、盐浴钎焊和真空钎焊等工艺方法。根据 GB/T 13815—2008《铝基钎料》标准规定，铝基钎料的分类、型号、形状及熔化温度范围见表 3-3-12。

表 3-3-12 铝基钎料的分类、型号、形状及熔化温度

分类	钎料型号	熔化温度/℃	钎焊温度/℃	形状
铝硅	BAI88Si	577	580	丝、带、条、粉
	BAI90Si	577	590	丝、带
	BAI92Si	577	615	丝、带
铝硅铜	BAI67CuSi	525	535	条
	BAI86SiCu	520	585	丝、带、条
铝硅镁	BAI86SiMg	559	579	丝、带
	BAI88SiMg	559	591	丝、带
	BAI89SiMg	559	582	丝、带
	BAI90SiMg	559	607	丝、带

铝基钎料的化学成分应符合表 3-3-13 的规定。丝状、带状、条状钎料表面应光洁，不应有影响钎焊性能的油污、夹杂物、起皮、分层和裂纹等缺陷。每批钎料应在不同部位取三个代表性试样进行化学分析，在分析中如发现有其他元素时必须做进一步分析。如果分析结果不符合表 3-3-14 的规定应加倍取样对该项目进行复验。

表 3-3-13 铝基钎料的化学成分

型号	化学成分(质量分数,%)										
	Mn	Si	Cu	Zn	Fe	Mg	Cr	Ti	Mn	其他	
BAI88Si	余量	11.0 ~ 13.0	<0.30	<0.20	<0.8	<0.10	—	—	<0.05	0.15	
BAI90Si		9.0 ~ 11.0	<0.25	<0.10		<0.05		0.02	<0.05		
BAI92Si		6.8 ~ 8.2	27 ~ 29	<0.20		—	<0.15	—	<0.10		
BAI67CuSi		5.5 ~ 6.5	3.3 ~ 4.7					<0.15	<0.15		<0.15
BAI86SiCu		9.3 ~ 10.7	—						—		—
BAI86SiMg		11.0 ~ 13.0	—			0.20 ~ 1.0 2.0 ~ 3.0	—	<0.10			
BAI88SiMg		9.0 ~ 10.5	—								
BAI89SiMg		9.5 ~ 11.0	—								
BAI90SiMg		6.8 ~ 8.2	—								

3.3.2 银钎料

银钎料的熔点适中，工艺性好，并具有良好的强度、韧性、导电性、导热性和耐蚀性，是应用极广的硬钎料。

银钎料的主要合金元素是铜、锌、镉和锡等元素。铜是最主要的合金元素，因添加铜可降低银的熔化温度，又不会形成脆性相。铜的质量分数为 28% 的银铜合金为共晶成分，熔化温度 780℃。添加锌可进一步降低其熔化温度（Ag-Cu-Zn 合金系的最低熔化温度约为 670℃）。作为钎料用合金，除了熔化温度应尽可能低以外，还要考虑到它的组织和性能，即组织中不应出现脆性相，至少

不出现数量较多的脆性相，以免影响钎料的加工（如轧制、拉伸）性能和钎焊接头性能。就 Ag-Cu-Zn 合金而言，希望成分落于 Ag（银固溶体）相、Cu（铜固溶体）相或 Ag + Cu 相区域内，因为 Ag 相和 Cu 相都是韧性极好的相组织；如果合金成分落在 Cu/Ag + (Ag, Cu) Zn 两相区内尚可加工，因为 (Ag, Cu) Zn 相不太脆；如果合金成分落在 (Ag, Cu)₅Zn₈ 相区内，则合金就很难加工了。各种银铜锌钎料就是以不同银含量为基础（考虑钎料成本），配合不同的铜含量和锌含量以满足熔化温度和力学性能的要求所组成的合金。

加锡可使银铜锡合金的熔化温度降得很低，但熔化温度低的合金极脆，无实际使用价值。为了避免出现脆性，银铜锡钎料中锡的质量分数一般不高于 10%。为了进一步降低银钎料的熔化温度，可在银铜锌合金中加入镉。

银铜锌镉钎料是银钎料中性能最好的钎料，因为它的熔化温度低，润湿性和铺展性好，力学性能也很好，价格也不算高。唯一的缺点是镉为有害元素，镉蒸气对人体危害极大。从劳保和环保出发，含镉钎料应在被取代之列。根据长期以来的研究，发现只有锡可以取代镉。银铜锌锡钎料虽无毒，但无论在熔化温度、工艺性能、力学性能或者在价格等方面仍无法与银铜锌镉钎料媲美。

银基钎料适用于气体火焰钎焊、电阻钎焊、炉中钎焊、感应钎焊和浸渍钎焊等工艺方法，用途较广泛。根据 GB 10046—2008《银基钎料》标准规定，银基钎料的分类、型号、成分及熔化温度见表 3-3-14。

钎料表面应光洁，不应有影响钎焊性能的油污、夹杂物、起皮、针孔分层和裂纹等缺陷。钎料应具有良好的钎焊工艺性能。每批钎料应在不同部位取三个代表性试样进行化学分析，在常规分析中如发现有其他杂质时须作进一步分析，杂质元素的总质量分数不得超过 0.15%。

表 3-3-14 银钎料的分类、型号、化学成分及熔化温度

型号	化学成分(质量分数,%)								熔化温度范围/℃ (参考值)	
	Ag	Cu	Zn	Cd	Sn	Si	Ni	Mn	固相线	液相线
Ag-Cu 钎料										
BAg72Cu ^a	71.0 ~ 73.0	27.0 ~ 29.0	—	0.010	—	0.05	—	—	779	779
Ag-Mn 钎料										
BAg85Mn	84.0 ~ 86.0	—	—	0.010	—	0.05	—	14.0 ~ 16.0	960	960
Ag-Cu-Li 钎料										
B _{Ag} 72CuLi	71.0 ~ 73.0	余量	Li0.25 ~0.50						766	766
Ag-Cu-Zn 钎料										
B _{Ag} 5CuZn(Si)	4.0 ~ 6.0	54.0 ~ 56.0	38.0 ~ 42.0	0.010	—	0.05 ~ 0.25	—	—	820	820
B _{Ag} 12CuZn(Si)	11.0 ~ 13.0	47.0 ~ 49.0	38.0 ~ 42.0	0.010	—	0.05 ~ 0.25	—	—	800	830
B _{Ag} 20CuZn(Si)	19.0 ~ 21.0	43.0 ~ 45.0	34.0 ~ 38.0	0.010	—	0.05 ~ 0.25	—	—	690	810
B _{Ag} 25CuZn	24.0 ~ 25.0	39.0 ~ 41.0	33.0 ~ 37.0	0.010	—	0.05	—	—	700	790
B _{Ag} 30CuZn	29.0 ~ 31.0	37.0 ~ 39.0	30.0 ~ 34.0	0.010	—	0.05	—	—	680	765

(续)

型号	化学成分(质量分数,%)								熔化温度范围/℃ (参考值)	
	Ag	Cu	Zn	Cd	Sn	Si	Ni	Mn	固相线	液相线
Ag-Cu-Zn 钎料										
B _{Ag} 35CuZn	34.0 ~ 36.0	31.0 ~ 33.0	31.0 ~ 35.0	0.010		0.05	—	—	685	775
B _{Ag} 44CuZn	43.0 ~ 45.0	29.0 ~ 31.0	24.0 ~ 28.0	0.010		0.05	—	—	675	735
B _{Ag} 45CuZn	44.0 ~ 46.0	29.0 ~ 31.0	23.0 ~ 27.0	0.010		0.05	—	—	665	745
B _{Ag} 50CuZn	49.0 ~ 51.0	33.0 ~ 35.0	14.0 ~ 18.0	0.010		0.05	—	—	690	775
B _{Ag} 60CuZn	59.0 ~ 61.0	25.0 ~ 27.0	12.0 ~ 16.0	0.010		0.05	—	—	695	730
B _{Ag} 63CuZn	62.0 ~ 64.0	23.0 ~ 25.0	11.0 ~ 15.0	0.010		0.05	—	—	690	730
B _{Ag} 65CuZn	64.0 ~ 66.0	19.0 ~ 21.0	13.0 ~ 17.0	0.010		0.05	—	—	670	720
B _{Ag} 70CuZn	69.0 ~ 71.0	19.0 ~ 21.0	8.0 ~ 12.0	0.010		0.05	—	—	690	740
Ag-Cu-Sn 钎料										
B _{Ag} 60CuSn	59.0 ~ 61.0	29.0 ~ 31.0	—	0.010	9.5 ~ 10.5	0.005	—	—	600	730
Ag-Cu-Ni 钎料										
B _{Ag} 56CuNi	55.0 ~ 57.0	41.0 ~ 43.0	—	0.010	—	0.05	1.5 ~ 2.5	—	770	895
Ag-Cu-Zn-Sn 钎料										
B _{Ag} 25CuSn	24.0 ~ 26.0	39.0 ~ 41.0	31.0 ~ 35.0	0.010	1.5 ~ 2.5	0.05	—	—	680	760
B _{Ag} 30CuSn	29.0 ~ 31.0	35.0 ~ 37.0	30.0 ~ 34.0	0.010	1.5 ~ 2.5	0.05	—	—	665	755
B _{Ag} 34CuSn	33.0 ~ 35.0	35.0 ~ 37.0	25.5 ~ 29.5	0.010	2.0 ~ 3.0	0.05	—	—	630	730
B _{Ag} 38CuSn	37.0 ~ 39.0	35.0 ~ 37.0	26.0 ~ 30.0	0.010	1.5 ~ 2.5	0.05	—	—	650	720
B _{Ag} 40CuSn	39.0 ~ 41.0	29.0 ~ 31.0	26.0 ~ 30.0	0.010	1.5 ~ 2.5	0.05	—	—	650	710
B _{Ag} 45CuSn	44.0 ~ 46.0	25.0 ~ 28.0	23.5 ~ 27.5	0.010	2.0 ~ 3.0	0.05	—	—	640	680
B _{Ag} 55CuSn	54.0 ~ 56.0	20.0 ~ 22.0	20.0 ~ 24.0	0.010	1.5 ~ 2.5	0.05	—	—	630	660
B _{Ag} 56CuSn	55.0 ~ 57.0	21.0 ~ 23.0	15.0 ~ 19.0	0.010	4.5 ~ 5.5	0.05	—	—	620	655
B _{Ag} 60CuSn	59.0 ~ 61.0	22.0 ~ 24.0	12.0 ~ 16.0	0.010	2.0 ~ 4.0	0.05	—	—	620	685

(续)

型号	化学成分(质量分数,%)								熔化温度范围/℃ (参考值)	
	Ag	Cu	Zn	Cd	Sn	Si	Ni	Mn	固相线	液相线
Ag-Cu-Zn-Cd 钎料										
B _{Ag} 20CuZnCd	19.0 ~ 21.0	39.0 ~ 41.0	23.0 ~ 27.0	13.0 ~ 17.0	—	0.05	—	—	605	765
B _{Ag} 21CuZnCd	20.0 ~ 22.0	34.5 ~ 36.5	24.5 ~ 28.5	14.5 ~ 18.5	—	0.3 ~ 0.7	—	—	610	750
B _{Ag} 25CuZnCd	24.0 ~ 26.0	29.0 ~ 31.0	25.5 ~ 29.5	16.5 ~ 18.5	—	0.05	—	—	607	582
B _{Ag} 30CuZnCd	29.0 ~ 31.0	26.5 ~ 28.5	20.0 ~ 24.0	19.0 ~ 21.0	—	0.05	—	—	607	710
B _{Ag} 35CuZnCd	34.0 ~ 36.0	25.0 ~ 27.0	19.0 ~ 23.0	17.0 ~ 19.0	—	0.05	—	—	605	700
B _{Ag} 40CuZnCd	39.0 ~ 41.0	18.0 ~ 20.0	19.0 ~ 23.0	18.0 ~ 22.0	—	0.05	—	—	595	630
B _{Ag} 45CuZnCd	44.0 ~ 46.0	14.0 ~ 16.0	14.0 ~ 18.0	23.0 ~ 25.0	—	0.05	—	—	605	620
B _{Ag} 50CuZnCd	49.0 ~ 51.0	14.5 ~ 16.5	14.5 ~ 18.5	25.1 ~ 26.1	—	0.05	—	—	625	635
B _{Ag} 40CuZnCdNi	39.0 ~ 41.0	15.5 ~ 16.5	14.5 ~ 18.5	25.1 ~ 26.5	—	0.05	0.1 ~ 0.3	—	595	605
B _{Ag} 50CuZnCdNi	49.0 ~ 51.0	14.5 ~ 16.5	13.5 ~ 17.5	15.0 ~ 17.0	—	0.05	2.5 ~ 3.5	—	635	690
Ag-Cu-Zn-In 钎料										
B _{Ag} 40CuZnIn	39.0 ~ 41.0	29.0 ~ 31.0	23.5 ~ 26.5	In4.5 ~5.5					635	715
B _{Ag} 34CuZnIn	33.0 ~ 35.0	34.0 ~ 36.0	28.5 ~ 31.5	In0.8 ~1.2					660	740
B _{Ag} 30CuZnIn	29.0 ~ 31.0	37.0 ~ 39.0	25.5 ~ 28.5	In 4.5 ~5.5					640	755
B _{Ag} 56CuInNi	55.0 ~ 57.0	26.25 ~ 28.25	—	In13.5 ~15.5			2.0 ~ 2.5	—	600	710
Ag-Cu-Zn-Ni 钎料										
B _{Ag} 40CuZnNi	39.0 ~ 41.0	29.0 ~ 31.0	26.0 ~ 30.0	0.010	—	0.05	1.5 ~ 2.5	—	670	780
B _{Ag} 49ZnCuNi	49.0 ~ 50.0	19.0 ~ 21.0	26.0 ~ 30.0	0.010	—	0.05	1.5 ~ 2.5	—	660	705
B _{Ag} 54CuZnNi	53.0 ~ 55.0	37.5 ~ 42.5	4.0 ~ 6.0	0.010	—	0.05	0.5 ~ 1.5	—	720	855
Ag-Cu-Sn-Ni-Mn 钎料										
B _{Ag} 25CuZnMnNi	24.0 ~ 26.0	37.0 ~ 39.0	31.0 ~ 35.0	0.010	—	0.05	1.5 ~ 2.5	1.5 ~ 2.5	705	800
B _{Ag} 27CuZnMnNi	26.0 ~ 28.0	37.0 ~ 39.0	18.0 ~ 22.0	0.010	—	0.05	5.0 ~ 6.0	8.5 ~ 10.5	680	830
B _{Ag} 49CuZnMnNi	48.0 ~ 50.0	15.0 ~ 17.0	21.0 ~ 25.0	0.010	—	0.05	4.0 ~ 5.0	7.0 ~ 8.0	680	705

注：1. 单值均为最大值，“余量”表示100%与其余元素质量分数总和的差值。
2. 所有型号钎料的杂质最大含量（质量分数,%）是：Al0.001，Bi0.030，P0.008，Pb0.025；杂质总量为0.15；B_{Ag}60CuSn和B_{Ag}72Cu钎料的杂质总量为0.15；B_{Ag}25CuZnMnNi、B_{Ag}49ZnCuMnNi和B_{Ag}85Mn钎料杂质的杂质总量为0.30。

3.3.3 铜基钎料

铜基钎料适用于气体火焰钎焊、电阻钎焊、炉中钎焊、感应钎焊和浸渍钎焊等工艺方法，用途较广泛。根据 GB/T 6418—2008《铜基钎料》标准规定，铜基钎料的分类（分为高铜钎料、铜锌钎料、铜磷钎料、特种铜合金）和型号见表 3-3-15。磷在铜中起两种作用：一是磷能显著降低铜的熔点，二是磷在空气中钎焊铜时起自钎剂作用。当铜中含 P 为 8.4%（质量分数）时，铜与磷形成熔化温度为 714℃ 的低熔点共晶，其组织由（Cu）+ Cu₃P 组成。Cu₃P 为脆性相。随着铜中的磷含量增加，该脆性相增多，超过共晶成分的铜磷合金由于太脆而无实用价值。Cu₃P 相给铜磷钎料带来脆性，它的韧性比银钎料差得多，只能在热态下挤压或轧制。为了进一步降低铜磷合金的熔化温度和改进行其韧性，可加银。银价格较高，为了节约银，可在铜磷钎料中加锡，以达到降低熔化温度的目的。铜磷和铜磷银钎料只能用来钎焊铜和铜合金，不能用来钎焊钢、镍基合金和含镍量大于 10%（质量分数）的铜镍合金。这类钎料在加热慢时大都有偏析作用，应尽量采用快速加热的钎焊方法。

表 3-3-15 铜基钎料的分类和型号

分 类	型 号	分 类	型 号
高铜钎料	BCu87	铜磷钎料	BCu92PAg
	BCu99		BCu91PAg
	BCu100-A		BCu89PAg
	BCu100-B		BCu88PAg
	BCu100-(P)		BCu87PAg
	BCu99Ag		BCu80AgP
	BCu97Ni(B)		BCu76AgP
铜锌钎料	BCu48ZnNi(Si)		BCu75AgP
	BCu54Zn		BCu80SnPAg
	BCu57ZnMnCo		BCu87PSn(Si)
	BCu58ZnMn		BCu86SnP
	BCu58ZnMn		BCu66SnPNi
	BCu58ZnFeSn(Si)(Mn)		BCu92PSb
	BCu58ZnSn(Ni)(Mn)(Si)	特种铜钎料	BCu94Sn(P)
	BCu59Zn(Sn)(Si)(Mn)		BCu88Sn(P)
	BCu60Zn(Sn)		BCu98Sn(Si)(Mn)
	BCu60ZnSn(Si)		BCu97SiMn
	BCu60Zn(Si)(Mn)		BCu96SiMn
铜磷钎料	BCu95P		BCu92AlNi(Mn)
	BCu94P		BCu92Al
	BCu93P-A		BCu89AlFe
	BCu95P-B		BCu74MnAlFeNi
	BCu92P		BCu84MnNi

铜基钎料的化学成分应符合表 3-3-16、表 3-3-17 的规定。丝状、带状、条状钎料表面应光洁，不应有影响钎焊性能的油污、夹杂物、起皮、分层和裂纹等缺陷。每批钎料应在不同部位取三个代表性试样进行化学分析，在分析中如发现有其他元素时必须作进一步分析，以确定杂质总量是否超过规定的要求。如分析结果不符合表 3-3-16、表 3-3-17 规定应加倍取样复验分析。铜基钎料的熔

化温度见表 3-3-18。

表 3-3-16 铜和铜锌钎料的化学成分

型号	化学成分(质量分数,%)										
	Cu	Zn	P	Sn	Si	Fe	Mn	Ni	Al	Pb	Co
BCu	99.9	—	0.075	—	—	—	—	—	0.01*	0.02	—
BCu54Zn	53.0~55.0	余量	—	—	—	—	—	—	—	0.015*	—
BCu58ZnMn	57.0~59.0		—	—	—	0.15	3.7~4.3	—	—	0.015*	—
BCu60ZnSn-R	59.0~61.0		—	0.8~1.2	0.15~0.35	—	—	—	—	0.10*	—
BCu58ZnFe-R	57.0~59.0		—	0.7~1.0	0.05~0.15	0.35~1.20	0.03~0.09	—	0.10*	0.20*	—
BCu48ZnNi-R	46.0~50.0		0.25	—	0.04~0.25	—	—	9.0~11.0	0.10*	0.05*	—
BCu57ZnMnCo	56.0~58.0		—	—	—	—	0.5~2.5	—	—	—	1.5~2.5
BCu62ZnNiMnSi-R	61.0~63.0		—	0.1	0.1~0.3	—	0.1~0.3	0.3~0.5	—	—	—

注：1. 表中单数值表示最大值。
2. 杂质总量中，BCu≤0.10%（质量分数），铜锌钎料≤0.50%（质量分数），杂质总量包括标有“*”元素的含量。

表 3-3-17 铜磷钎料的化学成分

型号	化学成分(质量分数,%)							杂质总量 ≤
	Cu	Sb	P	Ag	Sn	Si	Ni	
BCu93P	余量	—	6.8~7.5	—	—	—	—	0.15
BCu92PSb		1.5~2.5	5.8~6.7	—	—		—	
BCu86SnP		—	4.8~5.8	—	7.0~8.0		0.4~1.2	
BCu91PAg		—	6.8~7.2	1.8~2.2	—		—	
BCu89PAg		—	5.8~6.7	4.8~5.2	—		—	
BCu80AgP		—	4.8~5.3	14.5~15.5	—		—	
BCu80SnPAg		—	4.8~5.5	4.5~5.5	9.5~10.5		—	

表 3-3-18 铜基钎料的熔化温度

型号	熔化温度/℃		型号	熔化温度/℃	
	固相线	液相线		固相线	液相线
BCu	—	1083	BCu93P	710	800
BCu54Zn	885	888	BCu92PSb	690	800
BCu58ZnMn	880	909	BCu86SnP	620	670
BCu60ZnSn-R	890	905	BCu91PAg	645	790
BCu58ZnFe-R	865	890	BCu89PAg	645	815
BCu48ZnNi-R	921	935	BCu80AgP	645	800
BCu57ZnMnCo	890	930	BCu80SnPAg	560	650
BCu62ZnNiMnSi-R	853	870	—	—	—

3.3.4 锰基钎料

锰基钎料多用于工作温度高于 600℃的不锈钢钎焊接头。锰的熔点为 1235℃，为了降低其熔点可加入镍。Mn60%和 Ni40%（质量分数）形成熔点为 1005℃的低熔固溶体，延性优良。锰基钎料就是以 Ni-Mn 合金为基体，加入不同量的合金元素组成的。锰基钎料的蒸气压高，不能用于高真空钎焊；锰又容易氧化，也不适用于火焰钎焊。主要用于氩气保护的炉中钎焊和感应钎焊以及较低真空钎焊。

锰基钎料适用于气体保护的炉中钎焊、感应钎焊和真空钎焊等工艺方法。根据 GB/T 13679—1992《锰基钎料》标准规定，锰基钎料的分类、型号、熔化温度和钎焊温度见表 3-3-19。

表 3-3-19 锰基钎料的分类、型号、熔化温度和钎焊温度

分类	钎料型号	熔化温度/℃	钎焊温度/℃
锰镍铬	BMn70NiCr	1035 ~ 1080	1140 ~ 1180
	BMn40NiCrCoFe	1065 ~ 1135	1160 ~ 1200
锰镍铬	BMn68NiCo	1050 ~ 1070	1120
	BMn65NiCoFeB	1010 ~ 1035	1140 ~ 1100
锰镍铜	BMn52NiCuCr	1000 ~ 1010	1060
	BMn50NiCuCrCo	1010 ~ 1035	1080
	BMn45NiCu	920 ~ 950	1000

锰基钎料的化学成分应符合表 3-3-20 规定。带状及丝状钎料表面应光洁，不应有影响钎焊性能的油污、氧化膜、夹杂物、分层和裂纹等缺陷。每批钎料不超过 200kg 应在不同部位随机抽取三个试样进行化学分析，在分析中如发现有其他杂质元素时必须作进一步分析。如分析结果不符合表 3-3-21 的规定应加倍取样对该项目进行复验。

表 3-3-20 锰基钎料的化学成分

型号	化学成分(质量分数,%)										
	Mn	Ni	Cu	Cr	Co	Fe	B	C	S	P	其他
BMn70NiCr	余量	24.0 ~ 26.0	—	4.5 ~ 5.5	—	—	—	≤0.10	≤0.20	≤0.20	≤0.30
BMn40NiCrCoFe		40.0 ~ 42.0	—	11.0 ~ 13.0	2.5 ~ 3.5	3.5 ~ 4.5	—				
BMn68NiCo		21.0 ~ 23.0	—	—	9.0 ~ 11.0	—	—				
BMn65NiCoFeB		15.0 ~ 17.0	—	—	15.0 ~ 17.0	2.5 ~ 3.5	0.02 ~ 0.01				
BMn52NiCuCr		27.5 ~ 29.5	13.5 ~ 15.5	4.5 ~ 5.5	—	—	—				
BMn50NiCuCrCo		26.5 ~ 28.5	12.5 ~ 14.5	4.0 ~ 5.0	—	—	—				
BMn45NiCu		19.0 ~ 21.0	34.0 ~ 36.0	—	—	—	—				

3.3.5 镍基钎料

当要求钎焊件在更高温度下工作时可以采用镍基钎料。镍基钎料以镍为基体，并添加了能降低熔点及提高其热强度的元素。镍的熔点虽高（1452℃），但硼、硅、磷等元素能降低其熔点。镍基钎料的组织中含大量金属间化合物相，非常脆，无法进行塑性变形加工。因此镍基钎料通常是以粉状、粘带和非晶态箔供应的。粉状钎料在使用时需要加入有机粘结剂制成膏状，才能安放在接头处。粘带钎料是用粉状钎料和有机粘结剂调和，再轧制成粘带。非晶态箔是将熔融状态的镍基钎料以 10⁶℃/s 的冷却速度在水冷铜辊上凝固，形成有一定挠性的、成分极为均匀的钎料箔。粘带钎料和非晶态钎料均用于大面积钎焊，但非晶态钎料箔比粘带钎料和粉状钎料在工艺性能方面具有明显的优越性。非晶态钎料和非晶态预晶化处理钎料的润湿性均比晶态钎料和粘带钎料好。非晶态钎料由于成分非常均匀，当加热到液相线时几乎是同时、均一地熔化和铺展；而晶态钎料存在较大的熔析现象。因各相的熔点不一样，当加热到液相线时，先是低熔点相熔化和铺展，随后高熔点部分因铺展缓慢而堆积，造成分层现象。其次，非晶态钎料中的杂质及气体含量极低，而晶态钎料的含量较高，尤其是氧含量和氮含量要高出几十倍。因此非晶态钎料的熔化表面非常洁净，而晶态钎料熔化表面有明显的黑灰色渣块，为 Fe、Cr、Si 的氧化物。

镍基钎料钎焊不锈钢时的一个重要特征是钎焊接头性能对接头间隙值极为敏感。镍基钎料由于熔化温度的要求，常加入较多的硼、硅或磷等元素，使钎料含有相当多的脆性金属间化合物相。钎焊过程中，钎料中的硼、硅等元素向不锈钢扩散。当间隙很小时，钎缝中这些元素的含量少，扩散

距离又短，因此在钎焊时间内得以全部扩散，使钎缝组织变为铬在镍中的固溶体，因此接头的强度和延性都很好。反之，间隙大时，钎缝中的硼、硅量增多，扩散距离也增大，这些元素来不及向母材全部扩散，因此钎缝中央留下连续的脆性化合物相，接头的强度和延性就下降。由于硼的原子直径小，扩散速度快，并且容易向母材的晶界扩散，因此比较容易扩散；硅的原子直径大，主要是体积扩散，扩散速度慢，钎缝中的脆性相不易消失。所以用含硼的镍基钎料，随着间隙增大，接头的强度和延性虽下降，但下降稍慢一些；用不含硼而硅含量高的钎料钎焊时，随着接头间隙的增大，接头的强度和延性急剧下降。用含磷的钎料钎焊时，由于磷不向母材扩散，钎缝中的磷化物相即使在间隙很小的情况下也不消失，接头的强度和延性就很低了。

镍基钎料适用于炉中钎焊、感应钎焊和电阻钎焊等工艺方法。根据 GB/T 10859—2008《镍基钎料》标准规定，镍基钎料的分类、型号和钎焊参考温度见表 3-3-21。

镍基钎料的化学成分应符合表 3-3-22 的规定。钎料可以棒状、箔带状、粉状等形式供货，棒状钎料应表面光洁，没有影响钎焊性能的夹杂物及氧化皮等缺陷。粉状钎料外观应呈金属光泽，不得有其他夹杂物和油污。钎料应具有良好的钎焊工艺性能，在合适的钎焊工艺条件下，钎缝表面不应有未熔化的残留物。

表 3-3-21 镍基钎料的分类、型号和钎焊参考温度

类别	钎料型号	固相线/℃	液相线/℃	钎焊参考温度/℃
镍铬硅硼	BNi74CrSiB	975	1040	1065 ~ 1205
	BNi75CrSiB	975	1075	1075 ~ 1205
	BNi82CrSiB	970	1000	1010 ~ 1175
镍镉钨硼	BNi68CrWB	970	1095	1150 ~ 1250
镍硅硼	BNi92SiB	980	1040	1010 ~ 1175
	BNi93SiB	980	1065	1010 ~ 1175
镍铬硅	BNi71CrSi	1080	1135	1150 ~ 1250
镍磷	BNi89P	875	875	925 ~ 1025
镍铬磷	BNi76CrP	890	890	925 ~ 1040
镍锰硅铜	BNi66MnSiCu	980	1010	1010 ~ 1095

表 3-3-22 镍基钎料的化学成分 (质量分数,%)

型号	Ni	Cr	B	Si	Fe	C	P	W	Mn		其他		
BNi74CrSiB	余量	13.0 ~ 15.0	2.75 ~ 3.50	4.0 ~ 5.0	4.0 ~ 5.0	0.60 ~ 0.90	0.02	—	—	—	0.50		
BNi75CrSiB		6.0 ~ 8.0			2.5 ~ 3.5	0.06							
BNi82CrSiB													
BNi68CrWB		9.5 ~ 10.5	2.20 ~ 2.80	3.0 ~ 4.0	2.0 ~ 3.0	0.30 ~ 0.60		11.5 ~ 12.5					
BNi92SiB		—	2.75 ~ 3.50	4.0 ~ 5.0	0.5	0.06		—					
BNi93SiB		—	1.50 ~ 2.20	3.0 ~ 4.0	1.5								
BNi71CrSi		0.03	9.75 ~ 10.50		0.10								
BNi89P		—	—		0.20	0.10		10.0 ~ 12.0				—	
BNi76CrP			0.01	0.10	—	0.08		9.1 ~ 10.5					0.04
BNi66MnSiCu		—	—	3.0 ~ 8.0	—	0.10		0.02					21.0 ~ 24.5

3.4 钎剂

钎剂的组成物质主要取决于所要清除氧化物的物理化学性质。构成钎剂的组成物质可以是单一

组元（如硼砂、氯化锌等），也可以是多组元系统。多组元系统通常由基体组元、去膜组元和活性组元组成。钎剂的分类与钎料分类相适应，通常分为软钎剂、硬钎剂、铝用钎剂、气体钎剂等，分别适用于不同的场合。各种钎剂的分类见表 3-3-23。

表 3-3-23 各种钎剂的分类

钎剂大类	钎剂小类	物质分类	物质组成
软钎剂	无机软钎剂 (腐蚀性钎剂)	无机酸	盐酸、氢氟酸、磷酸
		无机盐	氯化锌、氯化铵、氯化锌-氯化铵
	有机软钎剂 (弱腐蚀性和无腐蚀)	弱有机酸	乳酸、硬脂酸、水杨酸、油酸
		有机胺盐	盐酸苯胺、磷酸苯胺、盐酸胍、盐酸二乙胺
		胺和酰胺类	尿素、乙二胺、乙酰胺、二乙胺、三乙醇胺
		天然树脂	松香、活化松香
硬钎剂	硼砂或硼砂基		
	硼酸或硼酐基		
	硼砂-硼酸基		
	氟盐基		
铝用钎剂	铝用软钎剂	铝用有机软钎剂(QJ204)	
		铝用反应钎剂(QJ203)	
	氯化物	氯化物	
		氧化物-氟化物	
		氟化物	
气体钎剂	炉中钎焊用气体钎剂	活性气体	氯化氢、氟化氢、三氟化硼
		低沸点液态化合物	三氯化硼、三氯化磷
		低升华固态化合物	氟化铵、氟硼酸铵、氟硼酸钾
	火焰钎焊用气体钎剂 (硼有机化合物蒸气)	硼酸甲酯蒸汽	
		硼酸酐酯蒸汽	

3.4.1 软钎剂

软钎剂是指在 450℃ 以下钎焊用的钎剂，由成膜物质、活化物质、助焊剂、稀释剂和溶剂等组成，可分为无机软钎剂和有机软钎剂两类。无机软钎剂具有很高的化学活性，去除氧化物的能力很强，热稳定性好，能促进液态钎料对钎焊金属的润湿，保证钎焊质量。这类钎剂适应钎焊温度范围较宽，但其残渣有强烈的腐蚀作用，故又称为腐蚀性软钎料，钎焊后必须清除干净。无机软钎剂可用于不锈钢、耐热钢、镍基合金等。有机软钎剂有水溶性和天然树脂（松香）之分，对母材几乎没有腐蚀性，故称非腐蚀性软钎剂。常用软钎剂的化学成分和性能见表 3-3-24。

表 3-3-24 常用软钎剂的化学成分和性能

类别	钎剂名称 (或型号)	化学成分 (质量分数,%)	钎焊温度 /℃	特 点
无机盐 软钎剂	氯化锌溶液(FS312A)	ZnCl ₂ 40, H ₂ O 60	290 ~ 350	ZnCl ₂ 去除氧化膜的作用在于形成络合酸而溶解氧化物,氯化铵为活化剂,可提高钎焊性能,但去除氧化膜的能力有限,故主要在锡铅钎料焊钢、铜及铜合金时使用
	氯化锌-氧化氨溶液(FS311A)	ZnCl ₂ 40, H ₂ O 55, NH ₄ ClO ₅	180 ~ 320	
	钎剂膏	ZnCl ₂ 20, 凡士林 75 NH ₄ Cl5	180 ~ 320	
	氯化锌盐酸溶液 FS322A	ZnCl ₂ 25, H ₂ O 50, HClO 25	180 ~ 320	有较强的去除氧化物能力。当锡铅钎料钎焊铬钢、不锈钢和镍铬合金时应选用这类钎剂或 ZnCl ₂ -NH ₄ Cl-HCl 溶液钎剂
	剂 205	ZnCl ₂ 50, H ₂ O 5, NH ₄ ClO 15, CdCl ₂ 30	250 ~ 400	在 ZnCl ₂ -NH ₄ Cl 钎剂基础上加入 CdCl ₂ 和 NaF 而成,可提高钎剂的熔化温度,配合镉基、锌基钎料钎焊铝青铜、铝黄铜等

(续)

类别	钎剂名称 (或型号)	化学成分 (质量分数,%)	钎焊温度 /℃	特 点
无机酸 软钎剂	磷酸 FS321	H ₃ PO ₄ 40 ~ 60 水 60 ~ 40	—	无机酸钎剂有磷酸、盐酸和氢氟酸等,通常以水溶液或酒精溶液形式使用,也可以与凡士林调成膏状使用 磷酸使用起来方便、安全,具有较强的去除氧化物的能力,钎焊铝青铜、不锈钢等合金时最为有效,也是最常用的无机酸软钎剂。盐酸、氢氟酸能强烈腐蚀金属,析出有害气体,故很少单独使用,一般仅作钎剂的添加成分
水溶性有 机软钎剂	FS213	乳酸 15,水 85 (活性温度 180 ~ 280℃) 盐酸胍 5,水 95 (活性温度 150 ~ 330℃)	—	水溶性有机软钎剂的组成物包括有机酸(如乳酸、水杨酸、柠檬酸等)、有机胺和酰胺类(如乙二胺、乙酰胺等)、氨基盐酸盐(盐酸乙二胺等)、醇类(如乙二醇、丙二醇等)和水溶性树脂及其他一些附加成分 有机酸和有机胺盐类有机软钎剂有较强的去除氧化物的能力,热稳定性尚好,残渣有一定的腐蚀性,属弱腐蚀性钎剂,主要用于电气零件的钎焊
松香类 有机钎剂	松香 FS111B FS111A	松香 100,松香 25, 酒精 75	150 ~ 300	松香是一种天然树脂,能溶于酒精、甘油、丙酮苯等而不溶于水,在温度高于 150℃时,能溶解银、铜、锡的氧化物,适用于铜、镉、锡、银的钎焊
	FS113A	松香 30,水杨酸 2.8, 三乙醇胺 1.4,酒精余量	150 ~ 300	适用于铜及铜合金的焊接
	RJ12	松香 30,氯化锌 3, 氯化铵 1,酒精 66	290 ~ 360	适用于铜、铜合金、镀锌铁及镍等的钎焊
	FS112A	松香 24,三乙醇氨 2, 盐酸二乙胺 4,酒精 70	200 ~ 350	

3.4.2 硬钎剂

硬钎剂是指在 450℃ 以上钎焊用的钎剂。黑色金属常用的硬钎剂的主要组分是硼砂、硼酸及其混合物。为了得到合适的熔点和增强去除氧化物的能力,可以添加各种碱金属或碱土金属的氟化物、氟硼酸盐等。

硼砂 (Na₂B₄O₇ · 10H₂O) 是单斜类白色透明晶体,易溶于水,加热到 200℃ 以上结晶水可全部蒸发。硼砂应在脱水后使用。硼砂中的硼酐与金属氧化物作用形成易熔的硼酸盐,并进一步分解形成偏硼酸钠,与硼酸盐形成熔点更低的混合物,而达到去除氧化物的目的,故可用作钎剂。

常用硬钎剂的化学成分、特点及用途见表 3-3-25。其中 FB102 钎剂是应用最广泛的通用钎剂;FB103 钎剂的钎焊温度最低,特别适用于银铜锌镉钎料;FB104 钎剂不含 KBF₄,钎剂不易挥发,在加热速度较慢的情况下仍可保持较长时间的活性。

硼砂和硼酸的混合物是应用很广泛的钎剂,但它们的活性温度很高,均在 800℃ 以上,因此也只适合于 800℃ 以上的钎焊,一般只能配合铜基钎料使用。去除氧化物的能力不强,不能去除 Cr、Si、Al、Ti 等的氧化物,故不能用于钎焊含这些元素的合金钢、不锈钢和高温合金等。这类残渣呈

玻璃硬壳状，不溶于水，虽腐蚀性不大，但清除困难。

表 3-3-25 常用硬钎剂的化学成分、特点及用途

牌号	化学成分(质量分数,%)	熔点/℃	钎焊温度/℃	特点及用途
YJ—1	硼砂 100	741	850 ~ 1150	现有硬钎剂主要是以硼砂、硼酸以及它们的混合物作基体,为了得到合适的熔点,增强去除氧化物的能力,而由添加的各种碱金属或碱土金属的氟化物、氟硼酸盐等组成,硼砂和硼酸的混合物主要用于铜基钎料钎焊铜及铜合金、碳素钢等
YJ—2	硼砂 25, 硼酸 75	766		
YJ—6	硼砂 15, 硼酸 80, CuF ₂ 5	—		
YJ—7	硼砂 50, 硼酸 35, KF 15	—	650 ~ 850	
QJ101	H ₃ BO ₃ 30 ~ 31 KBF ₄ 68 ~ 71	500	550 ~ 850	配合银钎料钎焊铜及铜合金、合金钢、不锈钢和高温合金等的钎剂,能有效地清除各种氧化物,促进钎料漫流,但易吸潮。钎焊后用质量分数为 15% 的柠檬酸水溶液刷洗钎焊的接头处,以防残余钎剂的腐蚀
QJ102	KF(脱水) 40 ~ 44 B ₃ O ₃ (硼干) 33 ~ 37 KBF ₄ 21 ~ 25	550	600 ~ 850	
QJ103	KBF ₄ > 95 K ₂ CO ₃ < 5	530	550 ~ 750	
QJ104	Na ₂ B ₄ O ₇ 49 ~ 51 Na ₂ BO ₃ 34 ~ 36 KF 14 ~ 16	650	650 ~ 850	配合银钎料钎焊铜及铜合金、合金钢、不锈钢等的钎剂,能有效地清除各种金属氧化物,促进钎料漫流,易吸潮
201 (前苏联)	H ₃ BO ₃ 80 Na ₂ B ₄ O ₇ 14.5 CaF ₂ 5.5	—	850 ~ 1150	配合铜基钎料钎焊不锈钢、合金钢、高温合金等
284 (前苏联)	KF(脱水) 35 KBF ₄ 42 B ₂ O ₃ 23	—	500 ~ 850	配合银钎料钎焊铜及铜合金、合金钢、不锈钢和高温合金等
FB101	硼酸 30, 氟硼酸钾 70		550 ~ 850	银钎料钎剂
FB102	无水氟化钾 42, 氟硼酸钾 23, 硼酐 35		600 ~ 850	应用最广的银钎料钎剂
FB103	氟硼酸钾 > 95, 碳酸钾 < 5		550 ~ 750	用于银铜锌镉钎料的钎剂
FB104	硼砂 50, 硼酸 35, 氟化钾 15		650 ~ 850	银钎料炉中钎焊用的钎剂

3.4.3 铝合金用钎剂

铝表面的氧化膜致密、稳定。钎焊铝及铝合金时必须采用专门的铝用钎剂。铝合金用钎剂按其使用温度分为铝用软钎剂和铝用硬钎剂两类。铝用软钎剂又分为有机软钎剂和反应软钎剂，其化学成分、特点及用途见表 3-3-26。铝用硬钎剂的基本组成是碱金属及碱土金属的氯化物，其化学成分、特点及用途见表 3-3-27。

表 3-3-26 常用的铝用软钎剂的化学成分、特点及用途

类别	牌号	名称	化学成分(质量分数,%)	熔点/℃	钎焊温度/℃	特点及用途
有机 软钎剂	QJ204 FS212— BAL	—	三乙醇胺 82.5 氟硼酸铵 5 氟硼酸镉 10 氟硼酸锌 2.5	—	180 ~ 275	铝用有机软钎剂是以三乙醇胺作溶剂加入几种氟硼酸盐,可在 180 ~ 270℃ 温度下破坏 Al ₂ O ₃ 膜,残渣对焊件有一定的腐蚀性,主要用于钎焊铝及铝合金,也可用于钎焊铝青铜和铝黄铜
	FS212— BAL	—	三乙醇胺 83 氟硼酸 10 氟硼酸镉 7	—		
	1060X	—	三乙醇胺 62 乙醇 20 Zn(BF ₄) ₂ 8 Sn(BF ₄) ₅ NH ₄ BF ₄ 5	—	250	

(续)

类别	牌号	名称	化学成分(质量分数,%)	熔点/℃	钎焊温度/℃	特点及用途
有机 软钎剂	1160U	—	三乙醇胺 37 松香 30 $\text{Zn}(\text{BF}_4)_2$ 10 $\text{Sn}(\text{BF}_4)_2$ 8 NH_4BF_4 15	—	250	铝用有机软钎剂是以三乙醇胺作溶剂加入几种氟硼酸盐,可在 180~270℃ 温度下破坏 Al_2O_3 膜,残渣对焊件有一定的腐蚀性,主要用于钎焊铝及铝合金,也可用于钎焊铝青铜和铝黄铜
反应 软钎剂	FS311-BAL	—	ZnCl_2 90 NaF 2 NH_4Cl 8	—	300~400	反应软钎剂主要组成为 Zn、Sn 等重金属氯化物。为了提高活性,添加了少量锂、钠、钾等卤化物,一般都会含 NH_4Cl 或 NH_4Br 以改善润湿性及降低熔化温度 当温度大于 270℃ 时能有效地破坏 Al_2O_3 膜,其作用是重金属氯盐渗透氧化铝膜裂缝并发生反应而破坏氧化铝与铝的结合。极易吸潮而失去活性,应密封保存。主要用于钎焊铝及铝合金,也可用于钎焊铜及铜合金、钢件等
	QJ203	铝电缆钎焊用钎剂	ZnCl_2 53~58 SnCl_2 27~30 NH_4Br 13~16 NaF 1.7~2.3	≈160	270~380	
	φ220A (前苏联)	—	ZnCl_2 90 NH_4Cl 8 KF 1.2 LiF 0.6 NaF 0.2	—	320~450	
	φ134	—	KCl 35 LiCl 30 ZnF_2 10 CdCl_2 15 ZnCl_2 10	—	390	

表 3-3-27 常用铝用硬钎剂的化学成分、特点及用途

牌号	名称	化学成分(质量分数,%)	熔点/℃	钎焊温度/℃	特点及用途
QJ201	铝钎焊钎剂	LiCl 24~35 KCl 47~51 ZnCl_2 6~10 NaF 9~11	420	450~620	极易吸潮,能有效地去除 Al_2O_3 膜,促进钎料在铝合金上漫流。活性极强,适用于在 450~620℃ 温度范围火焰钎焊铝及铝合金,也可用于某些炉中钎焊,是一种应用较广的铝钎剂,焊件须预热至 550℃ 左右
QJ202	铝钎剂	LiCl 40~44 KCl 26~30 ZnCl_2 19~24 NaF 5~7	350	420~620	极易吸潮,活性强,能有效地去除 Al_2O_3 膜,可用于火焰钎焊铝及铝合金,焊件须预热至 450℃ 左右
QJ206	高温铝钎剂	LiCl 31~26 KCl 31~33 ZnCl_2 7~9 SrCl_2 25 LiF 10	540	550~620	高温铝钎焊钎剂,极易吸潮,活性强,适用于火焰或炉中钎焊铝及铝合金,焊件须预热至 550℃ 左右

(续)

牌号	名称	化学成分(质量分数,%)	熔点/℃	钎焊温度/℃	特点及用途
QJ207	高温铝钎剂	KCl 43.5 ~47.5 CaF ₂ 1.5 ~2.5 NaCl 18 ~22 LiF 2.5 ~4.0 LiCl 25 ~29.5 ZnCl 1.5 ~2.5	550	560 ~620	与 Al-Si 共晶类型钎料相配,可用于火焰或炉中钎焊纯铝、3A21 及 6A02 等,能取得较好效果。极易吸潮,耐蚀性比 QJ201 好,黏度小,润湿性强,能有效地破坏 Al ₂ O ₃ 膜,焊缝光滑
Y-1 型	高温铝钎剂	LiCl 18 ~20 KCl 45 ~50 NaCl 10 ~12 ZnCl 7 ~9 NaF 8 ~10 AlF ₃ 3 ~5 PbCl ₃ 1 ~1.5	—	580 ~590	氟化物-氟化物型高温铝钎剂。去膜能力极强,保持活性时间长,适用于氧乙炔火焰钎焊。可顺利地钎焊工业纯铝、3A21、6A02、ZL12 等,也可以钎焊 2A11、5A02 等较难焊的铝合金,若用煤气火焰钎焊,效果更佳
NO. 17 (YT17)	—	LiCl 41,KCl 51 KF·AlF ₃ 8	—	500 ~560	适用于浸渍钎焊
—	—	LiCl 34,KCl 44 NaCl 12 KF·AlF ₃ 10	—	550 ~620	
QF	氟化物共晶钎剂	KF42,AlF ₃ 58 (共晶)	562	>570	具有“无腐蚀”的特点,纯共晶(KF-AlF ₃)钎剂可用于普通炉中钎焊、火焰钎焊纯铝或 3A21 防锈铝
—	氟化物钎剂	KF39,AlF ₃ 56 ZnF ₂ 0.3 KCl 4.7	540	—	是我国近年来新研制的钎焊铝用钎剂,活性期为 30s,耐蚀性好。可为粉状,也可调成糊状,配合钎料 400 适用于手工、炉中钎焊
129A	—	LiCl-NaCl-KCl- ZnCl ₂ -CdCl ₂ -LiF	550	—	可用于 2A12、5A02 铝合金火焰钎焊
171B	—	LiCl-NaCl-KCl- TiCl-LiF	490	—	

3.4.4 气体钎剂

气体钎剂是一种特殊类型的钎剂，按钎焊方法可分为炉中钎焊用气体钎剂和火焰钎焊用气体钎剂。这类钎剂最大的优点是钎焊后没有钎剂残渣，钎焊接头不需清洗。但这类钎剂及其反应物大多有一定的毒性，使用时应采取相应的安全措施。常用气体钎剂的种类和用途见表 3-3-28。

表 3-3-28 常用气体钎剂的种类和用途

气体	适用方法	钎焊温度/℃	适用材料
三氟化硼	炉中钎焊	1050 ~ 1150	不锈钢、耐热合金
三氯化硼	炉中钎焊	300 ~ 1000	铜及铜合金、铝及铝合金、碳钢及不锈钢
三氯化磷	炉中钎焊	300 ~ 1000	铜及铜合金、铝及铝合金、碳钢及不锈钢
硼酸甲酯	火焰钎焊	≥900	碳钢、铜及铜合金

在炉中钎焊中可用作钎剂的气体主要是气态的无机卤化物，包括氯化氢、氟化氢、三氟化硼、三氯化硼和三氯化磷等气体。氯化氢和氟化氢对母材有强烈的腐蚀性，一般不单独使用，只在惰性气体保护钎焊中少量添加，以提高去膜能力。

三氟化硼是最常用的炉中钎焊用气体钎剂，特点是对母材的腐蚀作用小，去膜能力强，能保证

钎料有较好的润湿性，可用于钎焊不锈钢和耐热合金。但去膜后生成的产物熔化温度较高，只适合于高温钎焊（1050 ~ 1150℃）。三氟化硼可以由放在钎焊容器中的氟硼酸钾在 800 ~ 900℃ 完全分解产生，并添加在惰性气体中使用，其体积分数应控制在 0.001% ~ 0.1% 范围内。

三氯化硼和三氯化磷气体对氧化物有更强的活性，且反应生成的产物熔化温度较低或易挥发，可在包括高温和中温的较宽温度范围（300 ~ 1000℃）进行碳钢及不锈钢、铜及铜合金、铝及铝合金的钎焊。该气体钎剂也应添加到惰性气体中使用，并使体积分数控制在 0.001% ~ 0.1% 的范围内。

火焰钎焊时，可采用硼有机化合物的蒸气作为气体钎剂，如硼酸甲酯蒸气等。该蒸气在燃气中供给，并在火焰中与氧反应生成硼酐，从而起到钎剂的作用，可在高于 900℃ 时钎焊碳钢、铜及铜合金等。

第 4 章 无铅钎焊技术

本章在简单介绍无铅钎焊技术的时代背景基础上，分析当今无铅钎焊材料的发展趋势，介绍钎焊方法面临的问题及改进措施。重点阐述各种无铅钎焊材料的特点、性能及焊点面临的可靠性问题。同时对无铅波峰焊、回流焊的工艺技术做了介绍。

4.1 采用无铅钎焊技术的必要性

4.1.1 无铅钎焊技术的提出

随着人类社会进入 21 世纪，以微电子技术为基础，以电子计算机、通信技术为核心的电子信息技术，已成为人类社会进步的主要推动力量。微电子封装中的互连技术也逐渐从传统的通孔组装技术（Through Hole Technology, THT）向表面组装技术（Surface Mount Technology, SMT）、球栅阵列（Ball Grid Array, BGA）、倒装芯片（Flip-Chip）和芯片级封装（Chip Scale Package, CSP）等高密度封装技术方向发展（图 3-4-1），极大地促进了计算机、通信等众多高技术领域的进步。

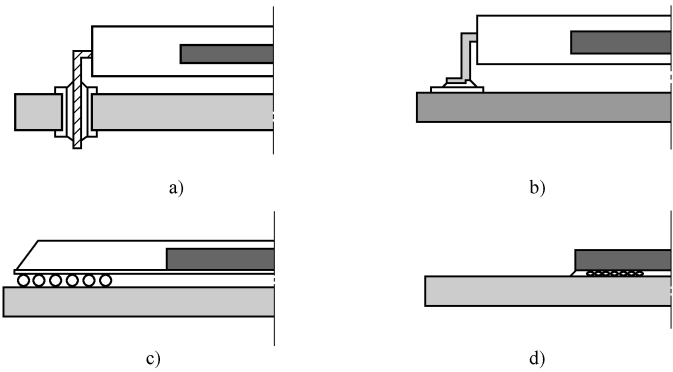


图 3-4-1 微电子组装互连接头形式

a) THT 组装 b) SMT 组装 c) BGA 组装 d) Flip-Chip 组装

Sn-Pb 钎料由于熔化温度低（约 183℃）、钎焊工艺性能好、储量丰富，在电子工业诞生之日起就得以大量应用。但随着人们环保意识的增强，含铅（Pb）钎料的负面影响日益突出。2003 年 2 月 13 日，欧盟颁布了“废弃电力电子设备指令”（Directive on Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE）和“电力电子设备中禁止使用某些有毒有害物质指令”（Directive on the Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment, RoHS），明确规定自 2006 年 1 月 1 日起电器、电子产品必须实现无铅化，北美、日本等工业发达国家也提出了相关的法规和禁令。我国也已制定了“电子信息产品生产污染防治管理办法”限制含铅钎料的使用。在政府层面的推动下，无铅化已经成为电子产品发展的必然趋势。

4.1.2 铅的危害及污染途径

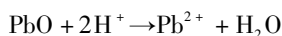
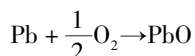
铅是一种有毒的金属元素，其对人的中枢神经系统造成危害，根据美国职业安全与健康署的规定，人体血液中的铅含量不能超过 50μg/dL。

铅对人体健康及环境的危害具体有以下几方面表现：

- 1) 对于胎儿或发育期儿童，铅中毒将严重损伤其学习能力和神经系统。
- 2) 儿童血液中铅含量超过 $4050\mu\text{g}/\text{dL}$ ，血红蛋白合成将发生困难，导致贫血。
- 3) 铅对肾有损伤作用，且有产生癌症可能。
- 4) 对水中动物而言，铅的主要副作用表现为脊椎畸形和尾部变黑。

5) 对于哺乳动物和鸟类来说，铅对血液系统、中枢神经、肾功能、再生系统和免疫系统有毒副作用。

铅的使用领域主要在蓄电池行业，约占全球铅产量的 80% 以上，而电子行业中的铅使用量仅为总量的 1% 左右。蓄电池中的铅回收容易，而电子产品由于使用的高度分散和回收处理的困难，致使电子产品报废时作为工业垃圾直接废弃。工业垃圾的废弃一般采用填埋的处理方式，其进入人体的路径如图 3-4-2 所示。在弱酸性溶液的环境下（酸雨），金属 Pb 先与酸性物质作用，转换成 Pb 离子，渗入地下水，然后进入人体，并沉积到骨骼和内脏中，进而对人体产生伤害。Pb 的离子化过程如下所示：



对于电子产品无铅化的铅含量的限定值，可根据欧盟的 RoHS 指令。在无铅钎料中，Pb 的质量分数不能超过 0.1%，即 Pb 只能看成是杂质元素。这一规定同样适合于电路板、元器件管脚的表面处理及其他含铅原材料的限定要求。因此无铅钎焊技术可理解为在钎料合金内及待连接的电子元器件管脚、电路板表面处理层等基材中不能人为添加金属元素铅的条件下，所进行的钎焊操作方法。

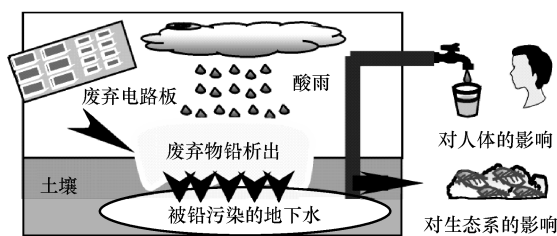


图 3-4-2 废弃电子产品污染路径示意图

4.1.3 无铅钎焊技术面临的挑战

无铅钎焊技术经过近十几年的发展，已取得了长足的进步，现有的无铅钎料合金体系，成分已得到工业界的认同，钎焊工艺日趋成熟，但还有许多问题需要解决，比如：

1) 绝大多数无铅钎料的熔化温度偏高，需要较高的钎焊温度。如回流焊时的温度为 $220 \sim 250^\circ\text{C}$ ；波峰焊时的钎焊温度为 $240 \sim 260^\circ\text{C}$ 。由于钎焊温度的提高，电子元器件的耐热、电路板的耐温及变形等问题越显突出。如目前的电子元器件、电路板的耐热设计标准为 235°C ，因此这个温度必须提高到 260°C 。

2) 无铅钎料的润湿性与传统的 Sn-Pb 钎料相比要差，钎焊工艺窗口较窄，钎焊设备及工艺需要做出相应的改进。如现有的红外回流焊设备很难满足要求，需要采用空气对流的回流焊设备，而且要增加温区数目，提高温度控制的精度。因此和传统的 Sn-Pb 钎料相比，钎焊参数的控制难度增加，致使焊点缺陷率增加。

3) 无铅钎料中锡（Sn）的质量分数一般都超过 90%，和传统的 Sn-37Pb 共晶钎料相比，含 Sn 量大大增加，界面反应加剧；其次，无铅钎料的熔化温度增加，润湿性较差，这都将导致钎焊温度、高温停留时间随之增加，以保证无铅钎料的充分铺展。但又要控制表面处理镀层和液态钎料的过度反应，造成互连焊点的性能降低。因此无铅钎焊时的缺陷率超过传统 Sn-Pb 钎料的钎焊，焊点缺陷的在线检测技术还不完善，一些精密封装的可靠性数据相当缺乏，如 BGA、Flip-Chip 封装等。

总之,无铅钎焊技术的推广应用已是一个不可逆转的趋势。电子信息技术的飞速发展又导致各种封装结构形式不断出现,其主要特征表现为互连焊点的特征尺寸越来越小(焊点体积、镀层厚度在微米级);焊点密度越来越高(焊点间距、焊点数量);服役环境越来越严酷(高温、高湿、腐蚀环境);外加载荷越来越复杂(热失配、大电流密度、高应变速率等),而互连焊点又是整个封装系统的薄弱环节,现今可靠性数据还相当缺乏。因此研制高性能的无铅钎料、开发控制精密的无铅钎焊设备、优化无铅钎焊参数及对焊点服役可靠性的深入研究,这一系列的问题都对我们提出了严峻的挑战,也为我们提供了广阔的研究领域。

4.2 无铅钎料简介

无铅钎料的提出是相对于传统的 Sn-Pb 钎料而言,由于 Sn 和 Pb 形成的相图是典型的共晶相图,因此在 Sn 中添加 Pb 可得到熔点较低的钎料合金。钎料无铅化就是要从 Sn 中去除 Pb,通过添加其他能和 Sn 形成共晶的合金元素来降低钎料合金的熔点,可加入的合金元素主要有 Ag、Cu、Bi、Sb、In、Zn 等。研究表明:Sn-Ag、Sn-Cu 二元合金系及它们的组合形成的 Sn-Ag-Cu 三元合金是 Sn-Pb 钎料的最佳替代钎料,并且已广泛应用在实际生产过程中。Sn-Bi、Sn-In 系合金可作为低温无铅钎料使用。Sn-Au 系合金可作为高温无铅钎料使用。而 Sn-Zn 系钎料合金的共晶温度是最接近 Sn-Pb 钎料合金的,并且材料成本最低,但必须克服其润湿性差、焊点耐蚀性差等一系列问题。

为了比较,本部分内容先对 Sn-Pb 钎料的性能进行简单的介绍,然后详细分析、介绍几种常见的无铅钎料合金。

4.2.1 Sn-Pb 系钎料

Sn-Pb 钎料的应用有几千年的历史,是电子封装行业中应用最为成熟的钎料。图 3-4-3 为 Sn-Pb 二元合金相图。从图 3-4-3 可知:Sn-Pb 二元合金构成的是有限固溶体的共晶相图。共晶成分 Sn 为 61.9%、Pb 为 38.1% (质量分数),共晶温度为 183℃,共晶体由体心正方的 β -Sn 相和面心立方的 α -Pb 相组成。共晶温度下,Sn 在 Pb 中的固溶度为 19.5% (质量分数),Pb 在 Sn 中的固溶度为 2.5% (质量分数)。室温时,Sn 在 Pb 中的固溶度为 2%~3% (质量分数),Pb 在 Sn 中的固溶度仅为万分之几。

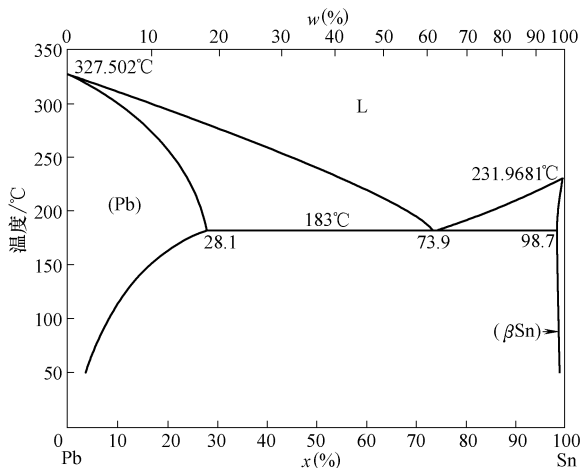


图 3-4-3 Sn-Pb 二元合金相图

图 3-4-4 给出了具有代表性的两种 Sn-Pb 钎料的组织,图 3-4-4a 为在白色的 β -Sn 相上分布微

细板状的 α -Pb 相，两相相互交叠形成典型的共晶组织。图 3-4-4b 为在 α -Pb 相基体上弥散分布微细的 β -Sn 相， β -Sn 相是冷却时固溶度减小而析出的产物。

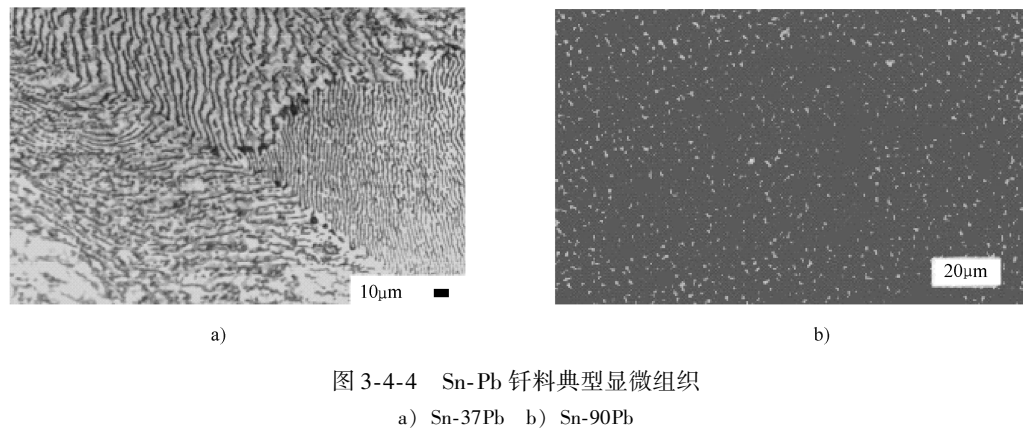


图 3-4-5 给出了 Sn-Pb 钎料物理性能和力学性能随合金成分的变化。从图 3-4-5 可知，Sn-Pb 钎料合金的电导率是随铅含量的增加而降低的，因此可以说铅含量高的钎料的电阻率比锡含量高的钎料电阻率高。Sn-Pb 钎料的力学性能则表现为在共晶成分偏高锡（Sn73%，质量分数）时力学性能最佳，而非共晶合金，但在实际应用时一般都选用共晶点附近成分的合金作为钎料（如 Sn-37Pb，Sn-40Pb 等）。这还要从钎焊性能、成本因素等多方面综合考虑，因此一般在电子组装行业，生产实际应用最多的还是把共晶点附近成分的 Sn-Pb 合金作为钎料。

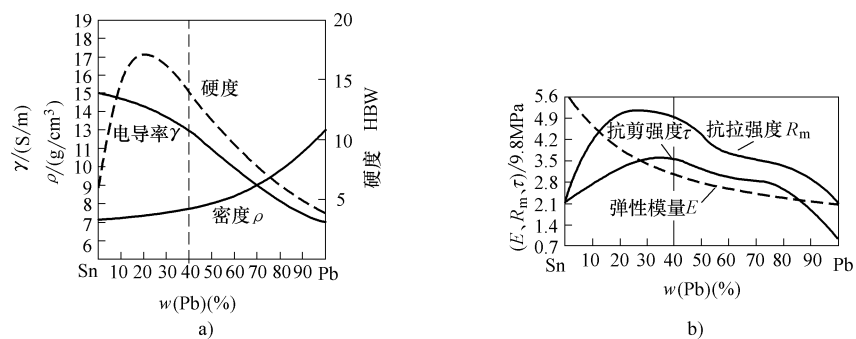


图 3-4-6 为 Sn-Pb 钎料在 Cu 表面上的铺展特性及流动性随合金成分的变化曲线。纯 Sn、纯 Pb 和共晶合金钎料都具有良好的流动性，而在固液相温度区间最大处（Sn9.5%，质量分数）的合金流动性最差。随温度的升高，合金的铺展面积增大，特别是共晶成分的钎料合金，铺展面积最大，加上此成分钎料合金的表面张力小，流动性最好，力学性能优异。一般来说，Sn-Pb 钎料对电子封装中的各种基板镀层（如 Cu、Ni、Au 等）均具有良好的润湿性和铺展能力。

4.2.2 Sn-Ag、Sn-Ag-Cu 无铅钎料合金

1. Sn-Ag 钎料合金

Sn-Ag 二元合金相图如图 3-4-7 所示，在高 Sn 端有一共晶反应，即 Ag 含量为 3.5%（质量分数），共晶温度为 221℃，共晶转变为 $L \rightarrow \beta - \text{Sn} + \epsilon(\text{Ag}_3\text{Sn})$ ，Ag 几乎不能固溶于 Sn，即所形成的相组织为不含 Ag 的 β -Sn 和细微的 Ag_3Sn 组成的典型的二元共晶组织。

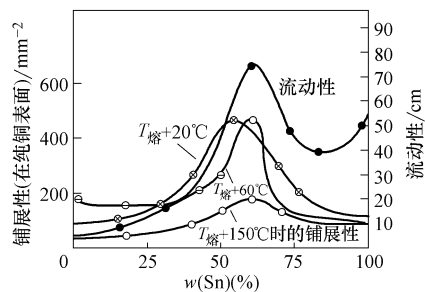


图 3-4-6 Sn-Pb 钎料在 Cu 表面上
的铺展特性及流动性

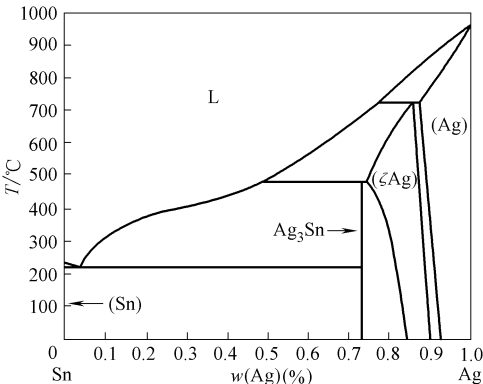


图 3-4-7 Sn-Ag 二元合金相图

图 3-4-8 为 Sn-3.5Ag 共晶合金的显微组织，和典型的共晶组织不同，图 3-4-8 中存在先结晶的 β -Sn 相，而后才发生共晶反应形成共晶相 (β -Sn + Ag_3Sn)。这说明 Sn-3.5Ag 共晶成分的合金凝固时存在过冷度， β -Sn 易形核先凝固形成初晶，然后在它们的间隙中发生共晶反应最终凝固。因此可以说， β -Sn 初晶应是树枝状的，而共晶反应形成的 β -Sn 和 Ag_3Sn 在形貌上是纤维状的。而凝固时的冷却速度将不仅影响组织的晶粒大小，还会影响初晶相和共晶相的比例，即冷却速度越大，共晶相越多，初晶相越少，反之亦然。

表 3-4-1 为 Sn-3.5Ag 钎料和 Sn-37Pb 钎料的物理性能比较。与 Sn-37Pb 钎料相比，其熔化温度升高 38℃，因此 Sn-3.5Ag 钎料的钎焊温度较 Sn-37Pb 钎料的钎焊温度高。Sn-3.5Ag 钎料的密度低于 Sn-37Pb 钎料，电导率和热导率均高于 Sn-37Pb 钎料，但线膨胀系数却较大。

表 3-4-1 Sn-3.5Ag 钎料和 Sn-37Pb 钎料的物理性能比较

性 能	Sn-3.5Ag	Sn-37Pb
熔化温度/℃	221	183
密度/(g/cm ³)	7.36	8.36
电导率/(μΩ·cm)	10.5	15.0
热导率/[W/(cm·℃)]	0.33(85℃)	0.51(30℃)
线膨胀系数(20℃)/(10 ⁻⁵ m/K)	30	25

对于 Sn-3.5Ag 钎料的力学性能，由于测试条件和制备试样的不同，目前公开的文献资料的数据存在很大的分散度。图 3-4-9 为 Sn-3.5Ag 钎料与 Sn-37Pb 钎料拉伸试验时的应力-应变关系比较。一般认为：Sn-3.5Ag 钎料的抗拉强度与 Sn-37Pb 钎料相当，弹性模量、硬度高于 Sn-37Pb 钎料，伸长率低于 Sn-37Pb 钎料，接头抗剪强度等于或高于 Sn-37Pb 钎料。表 3-4-2 为 Sn-3.5Ag 钎料和 Sn-37Pb 钎料的力学性能比较，可供参考。

表 3-4-2 Sn-3.5Ag 钎料和 Sn-37Pb 钎料的力学性能比较

性 能	Sn-3.5Ag	Sn-37Pb
抗拉强度/MPa	32.1 ~ 55	31 ~ 46
屈服强度/MPa	26.2	20.2
伸长率(%)	35	35 ~ 176
弹性模量/GPa	56	35
抗剪强度/MPa	32.1	28.4
硬度/HV	16.5	12.8

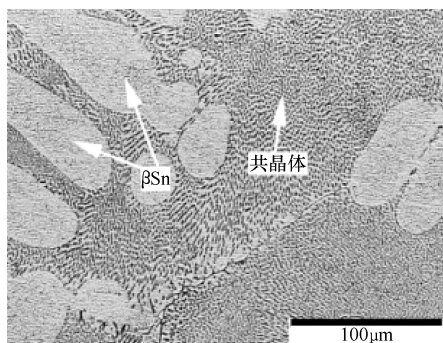


图 3-4-8 Sn-3.5Ag 共晶合金的显微组织

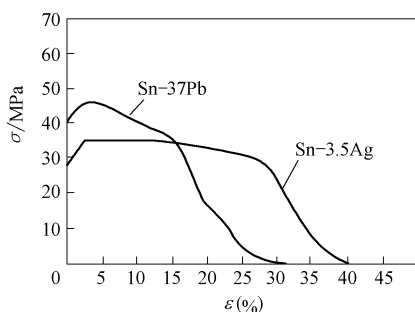


图 3-4-9 Sn-3.5Ag 钎料与 Sn-37Pb 钎料拉伸试验时的应力-应变关系比较

(拉伸试验条件: $6.56 \times 10^5 \frac{1}{s}$, 温度为 300K)

Sn-3.5Ag 钎料的蠕变速率与 Sn-Ag-Cu 钎料的蠕变速率大致相当。在低应力条件下比 Sn-40Pb 钎料低得多, 说明无铅钎料有更高的蠕变强度。但在高应力条件下, 两者的差别减小。图 3-4-10、图 3-4-11 分别为 Sn-3.5Ag 钎料和 Sn-40Pb 钎料的蠕变性能和蠕变断裂强度比较。

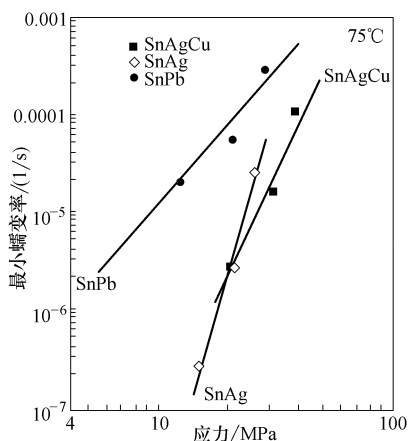


图 3-4-10 Sn-3.5Ag 钎料和 Sn-40Pb 钎料的蠕变性能比较

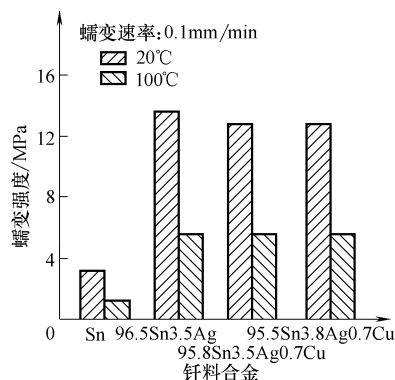


图 3-4-11 Sn-3.5Ag 钎料和 Sn-40Pb 钎料的蠕变断裂强度比较

Kanchanomai 研究了在不同频率交变载荷及塑性应变率的条件下, Sn-3.5Ag 钎料的低周疲劳寿命, 如图 3-4-12 所示。试验结果表明: 在相同的塑性应变率条件下, 随着频率的降低, 疲劳寿命降低; 当频率一定时, 疲劳寿命随塑性应变率的增加而降低。这说明在低频时, 裂纹扩展速率较快。

一般来说, Sn-3.5Ag 钎料的润湿性能要差于 Sn-37Pb 钎料。图 3-4-13 所示是采用非活性钎剂在氮气和空气中时, Sn-3.5Ag 钎料和 Sn-37Pb 钎料对 Cu 片的润湿时间比较。结果表明: Sn-37Pb 钎料的润湿时间大幅低于 Sn-3.5Ag 钎料, 并且随着加热温度的逐渐升高, 润湿时间逐渐减少, 但在两种钎料的过热度接近 60°C 时, 润湿时间趋于相同, 在氮气保护条件下, 钎料的润湿时间均减少。

图 3-4-14、图 3-4-15 分别为在相同条件下, Sn-3.5Ag 钎料和 Sn-37Pb 钎料润湿率和润湿角的比较。从图 3-4-14 可知: 在氮气保护时, Sn-37Pb 钎料的润湿率大约是 Sn-3.5Ag 钎料的 2 倍; 在空气中大约是 1.5 倍。在相同钎剂条件下, Sn-37Pb 钎料的润湿角大约是 Sn-3.5Ag 钎料的 1~3 倍 (图 3-4-15)。这说明无铅钎料的润湿性大幅低于 Sn-Pb 钎料。

2. Sn-Ag-Cu 钎料

在 Sn-Ag 合金中添加 Cu, 不仅可以降低熔点, 而且可减少母材 Cu 的溶蚀, 改善钎料的综合性

能。因此 Sn-Ag-Cu 系无铅钎料已被国际上公认为标准的无铅钎料，并逐渐在生产实际中得以大量应用。

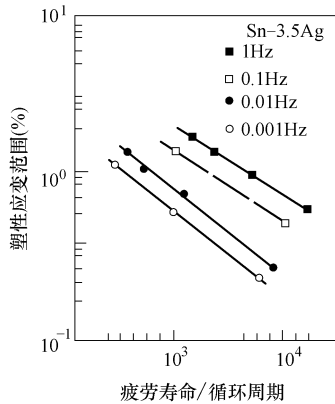


图 3-4-12 不同频率条件下疲劳寿命和塑性应变率的关系

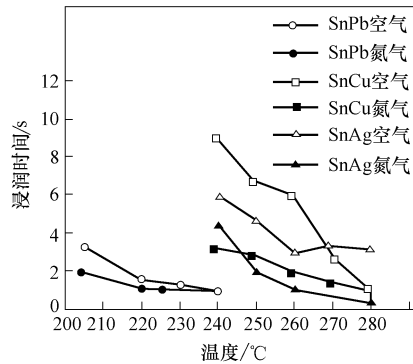


图 3-4-13 Sn-3.5Ag 钎料和 Sn-37Pb 钎料对 Cu 片的润湿时间比较

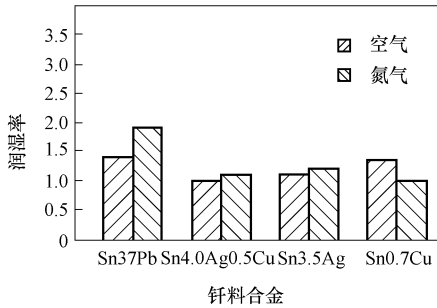


图 3-4-14 Sn-3.5Ag 钎料和 Sn-37Pb 钎料润湿率比较

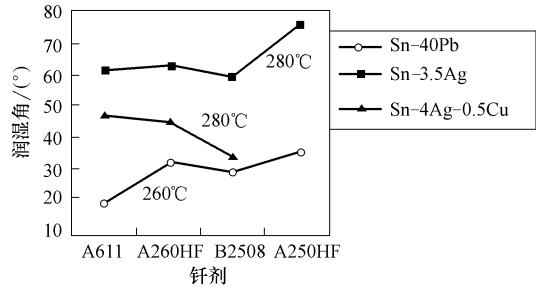


图 3-4-15 不同钎剂时 Sn-3.5Ag 钎料和 Sn-37Pb 钎料润湿角比较

图 3-4-16 所示为 Sn-Ag-Cu 液相等温面相图。其计算的三元共晶成分为 Sn-3.66Ag-0.91Cu，共晶点温度为 216.3℃。Moon 等通过精确的测量得出的共晶成分为 Sn-3.58 ± 0.05Ag-0.96 ± 0.04Cu，共晶点温度为 217.2℃ ± 0.2℃。图 3-4-17 为现业内较为常用的三种 Sn-Ag-Cu 钎料合金的 DSC 热分析图。结果表明：成分对熔化温度并没有太大的影响，在 217 ~ 219℃ 之间。目前大家较为认同的共晶成分范围为 Sn-3.5 ~ 4.0Ag-0.5 ~ 0.9Cu，共晶温度为 217℃，共晶转变为： $L \rightarrow \beta - \text{Sn} + \varepsilon(\text{Ag}_3\text{Sn}) + \eta(\text{Cu}_6\text{Sn}_5)$ 。

图 3-4-18 为 Sn-3.53Ag-0.97Cu 钎料合金显微组织。与 Sn-3.5Ag 钎料合金凝固过程一样，由于存在过冷度（Sn-Ag-Cu 共晶冷却时过冷度可达 20℃），由初晶相（ $\beta\text{-Sn}$ ）和共晶相（ $\beta\text{-Sn} + \varepsilon + \eta$ ）组成。 $\beta\text{-Sn}$ 呈树枝状， ε 相和 η 相微细颗粒呈纤维状分布在 $\beta\text{-Sn}$ 基体上（图 3-4-19），结晶过程类似亚共晶成分的结晶过程。随冷却速度的增加，共晶相增加，初生相减少。

Sn-Ag-Cu 钎料合金的物理性能和前面讨论的 Sn-Ag 钎料合金及将要讨论的 Sn-Cu 钎料合金一样，都是高 Sn 含量的合金，因此性能也是类似的，可参见表 3-4-1 和表 3-4-2。

对于 Sn-Ag-Cu 的力学性能，由于凝固时的冷却速度不同，会产生不同的显微组织，从而导致力学性能的不同。另一方面，拉伸试验时的应变速率的不同，也会造成力学性能的差异，同时试验温度也会产生同样的影响。

Suganuma 等对常用的三种 Sn-Ag-Cu 钎料合金在不同冷却速度的条件下，显微组织的变化及对力学性能的影响进行了研究。结果表明：合金凝固时的冷却速度增加及 Ag 含量增加，都会导致凝

固时的共晶相粗化，从而对力学性能产生影响。图 3-4-20 为 Sn-3.5Ag-0.7Cu 在不同应变速率、不同冷却速度时的应力-应变曲线。当合金凝固速度增加时，产生相同应变的应力增加；应变速率增加，产生相同应变的应力同样增加。图 3-4-21 为慢冷时应变速率对三种 Sn-Ag-Cu 合金抗拉强度、屈服强度和伸长率的影响。随着应变速率的增加，抗拉强度和屈服强度增加，但抗拉强度的增长速率大于屈服强度的增长速率；而伸长率则没有大的变化。但 Sn-3Ag-0.5Cu 合金的伸长率大大超过另外两种 Sn-Ag-Cu 合金的伸长率，这是由于高 Ag 时共晶相的粗化及出现粗大的针状 Ag_3Sn 所致。

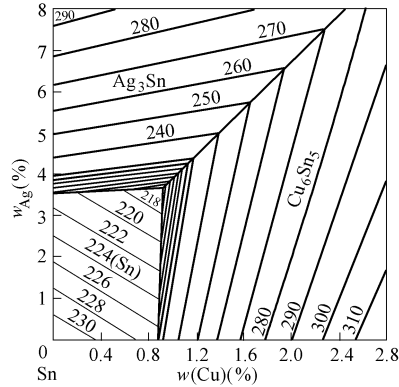


图 3-4-16 Sn-Ag-Cu 液相等温面相图（计算）

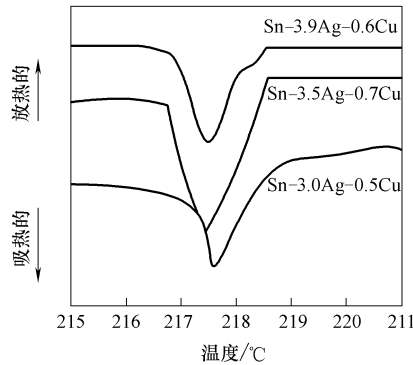


图 3-4-17 三种常用 Sn-Ag-Cu 钎料合金 DSC 热分析比较

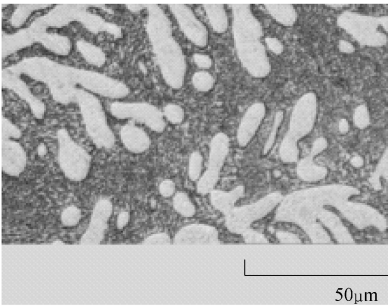


图 3-4-18 Sn-3.53Ag-0.97Cu 钎料合金显微组织

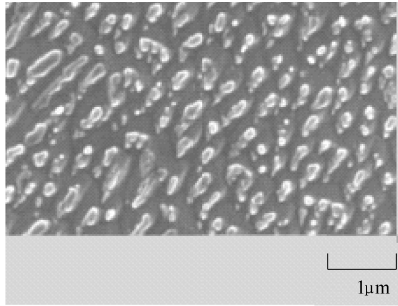


图 3-4-19 Sn-3.53Ag-0.97Cu 钎料合金共晶区显微组织

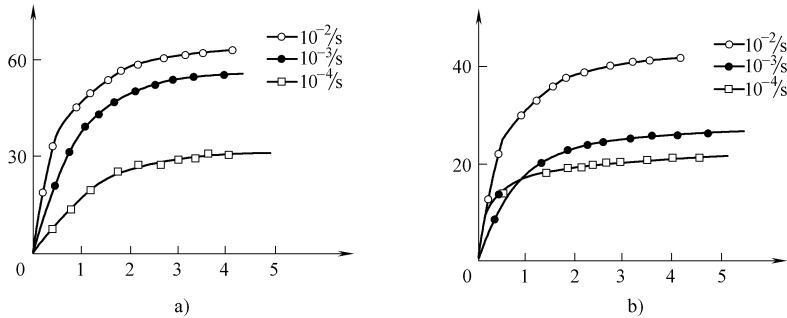


图 3-4-20 Sn-3.5Ag-0.7Cu 在不同应变速率、不同冷却速度时的应力-应变曲线
a) 快冷 b) 慢冷

Plumbridge 对几种无铅钎料和 Sn-37Pb 钎料的蠕变性能进行了研究（图 3-4-22）。结果表明：在 75℃ 的试验温度条件下，Sn-3.8Ag-0.8Cu 合金的抗蠕变能力大幅超过 Sn-37Pb 合金。随着蠕变

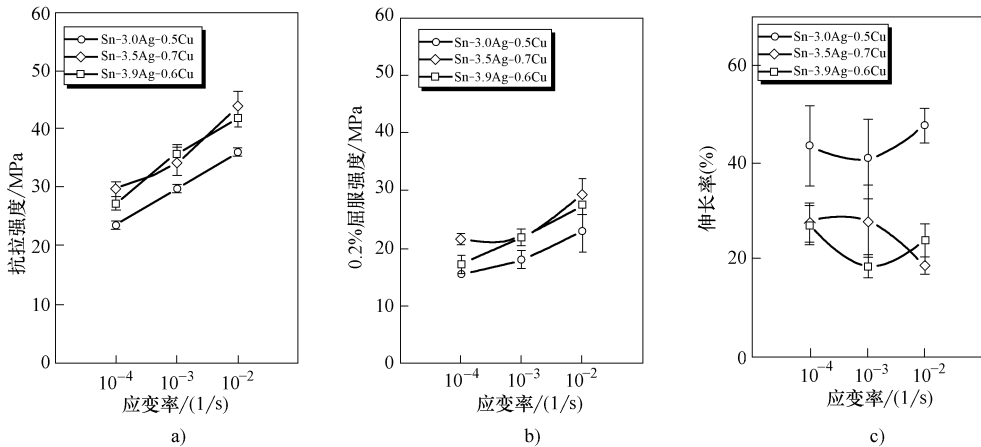


图 3-4-21 慢冷时应变速率对三种 Sn-Ag-Cu 合金的力学性能的影响

a) 抗拉强度 b) 屈服强度 c) 伸长率

应力的增加, 所有钎料合金的蠕变寿命都降低, 但 Sn-37Pb 合金降低的速率大于 Sn-3.8Ag-0.8Cu 合金; 所有无铅钎料合金 (如 Sn-3.5Ag、Sn-0.5Cu) 的蠕变抗力都大于 Sn-37Pb 钎料合金。

Kariya 对 Sn-3.5Ag-xCu 无铅钎料合金室温时的疲劳寿命进行了研究, 并和 Sn-37Pb 钎料合金进行了比较, 如图 3-4-23 所示。试验条件为拉-拉型对称锯齿波, 应变速率为 $5 \times 10^{-3}/s$, 应变范围为总应变的 0.3% ~ 3.5%, 疲劳寿命为载荷降低 50% 时的循环周次。从图 3-4-23 可知, 对于 Sn-3.5Ag-xCu 合金, Cu 含量对疲劳寿命并没有影响, Sn-3.5Ag-xCu 合金的疲劳寿命大于 Sn-37Pb 合金, 差值几乎在一个数量级, 说明 Sn-Ag-Cu 无铅钎料的疲劳寿命比 Sn-37Pb 钎料的疲劳寿命大得多。

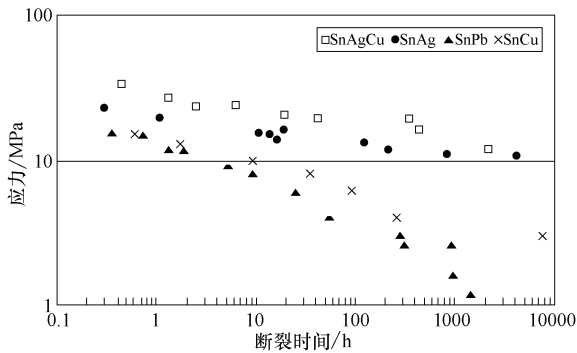


图 3-4-22 几种钎料合金的蠕变寿命比较图

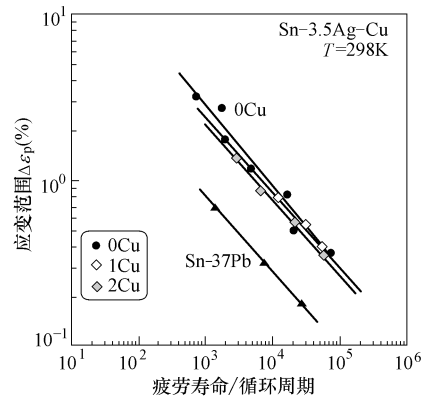


图 3-4-23 Sn-3.5Ag-xCu 应变差对疲劳寿命的影响

图 3-4-24 为采用不同钎剂时, Sn-Ag-Cu 钎料与 Sn-Pb 钎料润湿角的比较。可以看出, 无论采用何种钎剂, Sn-Pb 钎料的润湿性均好于 Sn-Ag-Cu 钎料; 钎剂活性增加, 两者润湿角的差别减小。如图 3-4-25 所示, 对不同温度下几种无铅钎料的润湿时间进行了比较, 结果表明: 在相同温度条件下, 润湿时间按下列次序递增: Sn-37Pb < Sn-3.5Ag-0.75Cu < Sn-0.3Ag-0.7Cu < Sn-0.75Cu, 说明无铅钎料的润湿性均比 Sn-Pb 钎料差; 在 Sn 中加 Ag 可提高钎料的润湿性; 所有的钎料都随钎焊温度的升高, 润湿时间单调下降。另外, 同种钎料在不同母材上的润湿性不同, 一般来说, 在 Cu 板上镀 Sn、Ag 和 Au/Ni 有助于改善钎料的润湿性。

总之, Sn-Ag-Cu 系无铅钎料由于熔点较低, 钎焊工艺性能良好, 综合力学性能较好, 特别是

抗蠕变性能及抗热疲劳性能大幅超过 Sn-Pb 钎料等一系列优点, 现已在实际产生中得以广泛应用。为进一步改善 Sn-Ag-Cu 钎料的综合性能, 人们考虑添加第四组元合金元素, 如添加低熔点的合金元素 Bi、In、Sb、Ga, 过渡金属元素 Ni、Co、Mn、Ti 及稀土元素 (La、Ce、Er、Lu 及 Y 等)。另一方面, 为了降低钎料的材料成本, 或出于高应变速率服役环境的考虑, 人们也开始了降低 Sn-Ag-Cu 系无铅钎料 Ag 含量的可能性研究。

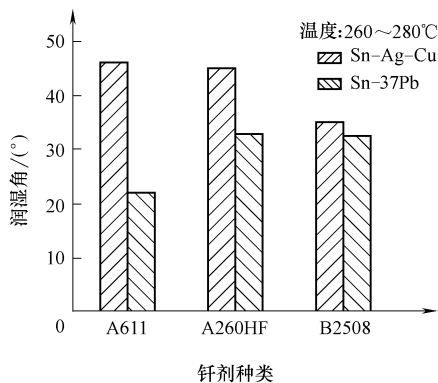


图 3-4-24 Sn-Ag-Cu 钎料与 Sn-Pb 钎料润湿角比较

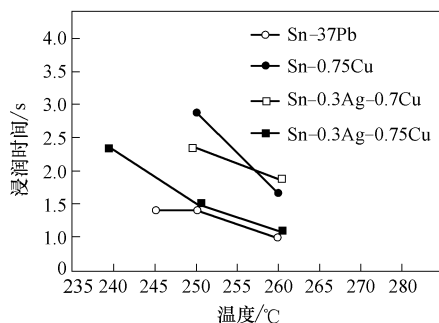


图 3-4-25 不同温度下几种无铅钎料和 Sn-Pb 钎料润湿时间比较

4.2.3 Sn-Cu、Sn-Cu-Ni 无铅钎料合金

1. Sn-Cu 无铅钎料合金

Sn-Cu 二元合金相图如图 3-4-26 所示, 在靠近 Cu 的一侧形成许多金属间化合物。当 Sn 的质量分数超过 60% 时, 可以看成是 Sn-Cu₆Sn₅ 二元共晶合金。其共晶成分含铜的质量分数为 0.7%, 共晶温度为 227°C, 共晶转变为 L→Sn + η (Cu₆Sn₅)。

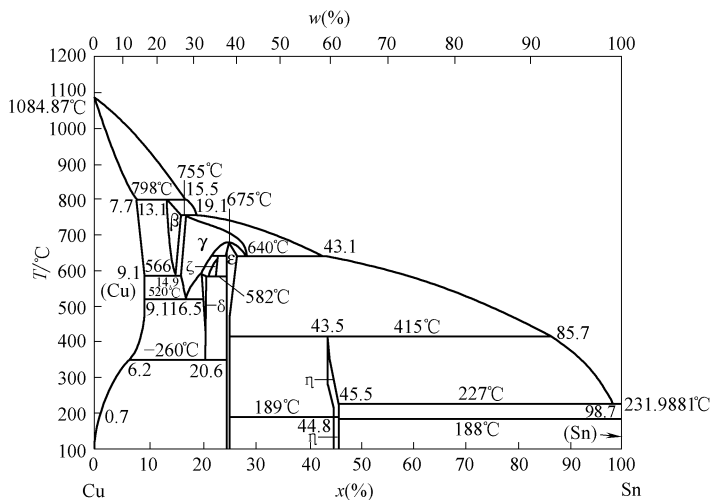


图 3-4-26 Sn-Cu 二元相图

Sn-0.7Cu 钎料合金的显微组织如图 3-4-27 所示, 由 β-Sn 初晶和包围着初晶的 β-Sn + η (Cu₆Sn₅) 组织组成, 这是由于锡在冷却过程中存在过冷度造成的。在共晶温度下, Cu 在 Sn 中的最大固溶度约为 0.01% (质量分数), 中间相 η 相中 Sn 的摩尔分数约为 45%, 具有六边形的超点阵结构, 其体积分数约占共晶组织的 1.7%。η 相在高温下不稳定, 如在 100°C 保温几十小时就会

转变为粗大的 Cu_6Sn_5 颗粒，因此 Sn-0.7Cu 钎料合金的高温力学性能（蠕变、热疲劳）较差，但好于 Sn-37Pb 钎料。另一方面，由于 Sn-0.7Cu 的熔化温度较高，不适宜于回流焊，但由于不含贵金属，材料成本较低，现已大量用于波峰焊的板级组装。

表 3-4-3 为 Sn-0.7Cu 钎料合金和 Sn-37Pb 钎料合金物理性能比较。可以看出，在主要无铅钎料中，Sn-0.7Cu 钎料的熔化温度最高，和 Sn-37Pb 钎料相比，电导率较低，密度较小，表面张力和 Sn-3.5Ag 相似。

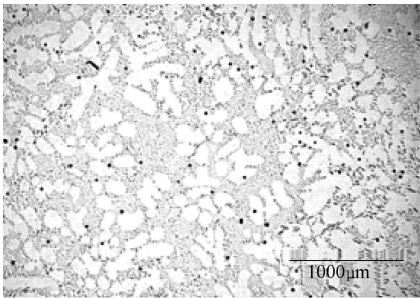


图 3-4-27 Sn-0.7Cu 钎料合金显微组织

表 3-4-3 Sn-0.7Cu 钎料合金和 Sn-37Pb 钎料合金物理性能比较

性 能	Sn-0.7Cu	Sn-37Pb
熔化温度/℃	227	183
密度/(g/cm ³)	7.31	8.36
电导率/(μΩ·cm)	10~15	15
表面张力/(×10 ⁻⁵ N/cm)	491(277℃,空气) 461(277℃,氮气)	417(233℃,空气) 464(233℃,氮气)

表 3-4-4 为 Sn-0.7Cu 钎料合金和 Sn-37Pb 钎料合金力学性能比较。可以看出，Sn-0.7Cu 钎料的抗拉强度较低，仅为 Sn-37Pb 钎料的 50%，但伸长率较高，较 Sn-37Pb 钎料提高了 45%，抗剪强度与 Sn-37Pb 钎料相当，但比 Sn-3.5Ag 钎料低，硬度两者相当。

表 3-4-4 Sn-0.7Cu 钎料合金和 Sn-37Pb 钎料合金力学性能比较

性 能	Sn-0.7Cu	Sn-37Pb
抗拉强度/MPa	23	46
屈服强度/MPa	37	37
伸长率(%)	45	31
抗剪强度/MPa	20~23(20℃)	23(20℃)
	16~21(100℃)	14(100℃)
硬度 HV	13	12.8

图 3-4-28 所示为 Sn-0.7Cu、Sn-3.9Ag-0.7Cu 钎料在不同温度下的稳态蠕变速率比较。可以看出，室温时两者的蠕变应力指数相同，但 Sn-0.7Cu 的稳态蠕变速率较大，这是由于在 Sn-0.7Cu 钎料中的第二相质点数量较少，对蠕变时位错的运动阻力较小所致。在高温时（120℃），Sn-0.7Cu 钎料的稳态蠕变速率增加更快，如在蠕变应力为 10MPa 时，Sn-0.7Cu 钎料和 Sn-3.9Ag-0.7Cu 钎料的稳态蠕变速率大约分别为 5×10^{-7} 、 1.2×10^{-8} ，相差一个数量级以上，这和 η 相的高温不稳定，

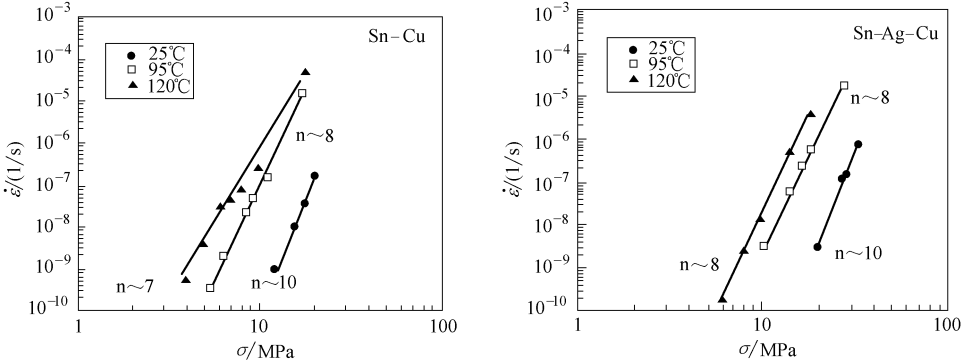


图 3-4-28 Sn-0.7Cu、Sn-3.9Ag-0.7Cu 钎料在不同温度下的稳态蠕变速率比较

要长大粗化有关。这也和图 3-4-22 的试验结果相符, Sn-0.7Cu 钎料的抗蠕变能力大于或等于 Sn-37Pb 钎料, 低于 Sn-3.5Ag 和 Sn-3.9Ag-0.7Cu 钎料, 而 Sn-3.5Ag 钎料抗蠕变的能力接近或小于 Sn-3.9Ag-0.7Cu 钎料。

John 等对 Sn-0.7Cu、63Sn-37Pb 钎料在低循环应变条件下的疲劳寿命进行了比较研究。从图 3-4-29、图 3-4-30 可以看出, 在所有的低周应变频率范围 ($10^{-3} \sim 1\text{Hz}$) 及所研究的温度区间 (298 ~ 398K) 内, Sn-0.7Cu 钎料的疲劳寿命均高于 Sn-37Pb 钎料, 说明 Sn-0.7Cu 钎料比 Sn-37Pb 钎料有更好的抗疲劳性能。

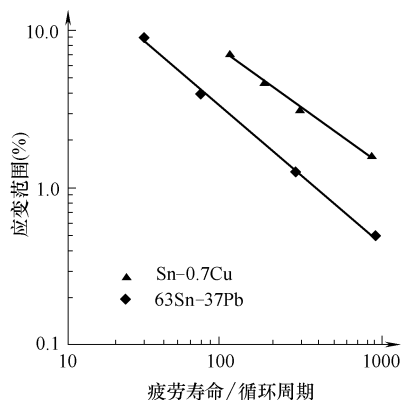


图 3-4-29 Sn-0.7Cu、63Sn-37Pb 钎料的疲劳寿命比较 (1Hz、298K)

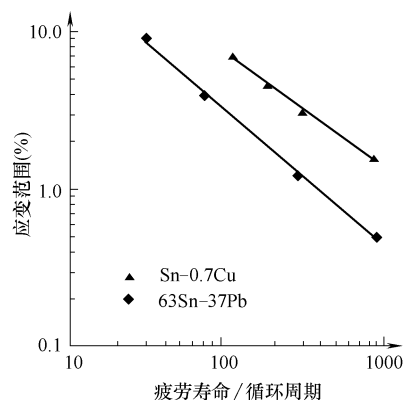


图 3-4-30 Sn-0.7Cu、63Sn-37Pb 钎料的疲劳寿命比较 (10^{-3}Hz 、398K)

他们同时还研究了低周循环应变频率、试验温度对 Sn-0.7Cu 钎料疲劳寿命的影响, 如图 3-4-31、图 3-4-32 所示。结果表明: 随着应变循环频率的增加, 疲劳寿命增加; 随着温度的增加, 疲劳寿命降低。

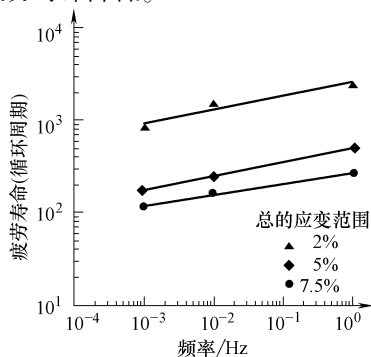


图 3-4-31 频率对 Sn-0.7Cu 钎料疲劳寿命的影响 (298K)

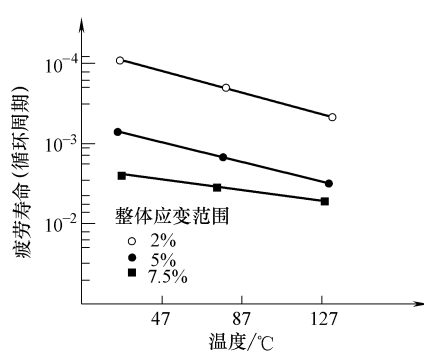


图 3-4-32 温度对 Sn-0.7Cu 钎料疲劳寿命的影响 (1Hz)

图 3-4-33 所示为几种无铅钎料在不同温度条件下和 Sn-37Pb 钎料的润湿铺展性能的比较。从图可知, 所有无铅钎料的润湿铺展率均小于 Sn-37Pb 钎料。一般来说, Sn-0.7Cu 钎料的外观质量较差, 这需要有相适应的钎剂配合, 才能得到好的润湿铺展及良好的外观质量。目前 Sn-0.7Cu 钎料已广泛应用于波峰焊, 成为 Sn-37Pb 钎料的替代品。

2. Sn-Cu-Ni 无铅钎料合金

Sn-0.7Cu 钎焊合金虽然已在无铅波峰焊中得以

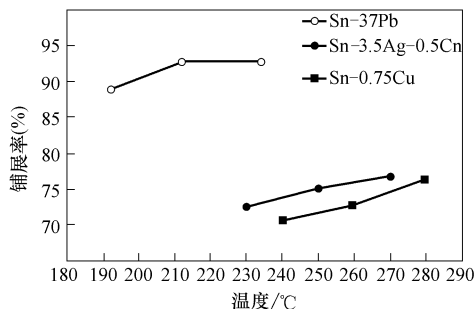


图 3-4-33 钎料合金的铺展性能比较

广泛应用，但由于润湿性较差、强度较低、焊点成形不好等不足，人们一直在寻求通过添加第三合金元素来改善 Sn-0.7Cu 钎料的性能，因此 Sn-0.7Cu-0.05Ni 钎料合金引起了人们的重视。表 3-4-5 为 Sn-0.7Cu-0.05Ni 钎料合金和 Sn-0.7Cu 、 Sn-37Pb 钎料合金的力学性能和比较，可以看出，通过在 Sn-0.7Cu 钎料中添加质量分数为 0.05% 的 Ni，就可提高其强度，但伸长率有所下降，其力学性能和 Sn-37Pb 钎料基本相同。

表 3-4-5 Sn-0.7Cu-0.05Ni 钎料合金力学性能比较

性 能	Sn-0.7Cu-0.05Ni	Sn-0.7Cu	Sn-37Pb
抗拉强度 /MPa	48	23	46
伸长率(%)	32	45	31

Snugovsky 和 Vuorinen 分别采用 DSC 和相图计算的方法得出了 Sn-Cu-Ni 合金三元相图 (图 3-4-34)。从图 3-4-34 可以看出，其共晶成分基本可以确定为 Cu 的质量分数在 0.5% ~ 0.8% 范围之间，Ni 的质量分数在 0.05% 附近，共晶温度为 228 ~ 229℃，共晶转变为 $L \rightarrow \beta - \text{Sn} + (\text{Ni}, \text{Cu})_3\text{Sn}_4 + (\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 。

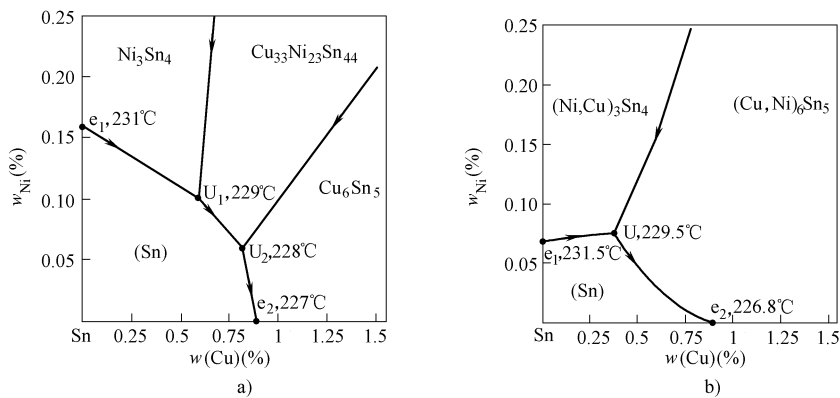


图 3-4-34 Sn-Cu-Ni 三元相图
a) 实测 b) 计算

Sn-0.7Cu-0.05Ni 合金的显微组织如图 3-4-35 所示，可见，初生 β -Sn 组织得以细化，并且整体的显微组织都比 Sn-0.7Cu 合金细化，共晶组织由 β -Sn 和细微颗粒状的 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 组成，没有发现 $(\text{Ni}, \text{Cu})_3\text{Sn}_4$ 相 (图 3-4-36)。由于 Ni 溶入 Cu_6Sn_5 相，形成了 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 相，而 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 相其实就是 Ni 固溶于 Cu_6Sn_5 相形成的，其最大固溶度为 9% (摩尔分数)，此时的 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 相最稳定，并且 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 相的硬度高于 Cu_6Sn_5 相，对合金的强化效果更好，因此加入少量的 Ni，将明显提高 Sn-0.7Cu 合金的强度。

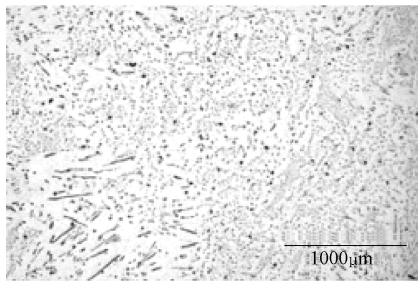


图 3-4-35 Sn-0.7Cu-0.05Ni 合金显微组织

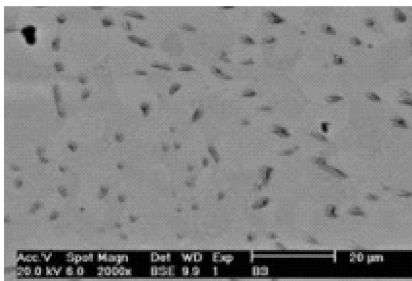


图 3-4-36 Sn-0.7Cu-0.05Ni 合金共晶组织

Rizvi 等比较研究了 Sn-0.7Cu-0.3Ni 钎料和 Sn-0.7Cu 钎料在 Cu 母材的润湿特性，如图 3-4-37、

图 3-4-38 所示。结果表明：无论在什么样的钎焊温度，也无论采用什么样的钎剂，Sn-0.7Cu-0.3Ni 钎料的最大润湿力大于 Sn-0.7Cu 钎料，润湿角小于 Sn-0.7Cu 钎料。说明微量 Ni 的添加，提高了 Sn-0.7Cu-0.3Ni 钎料的润湿性。

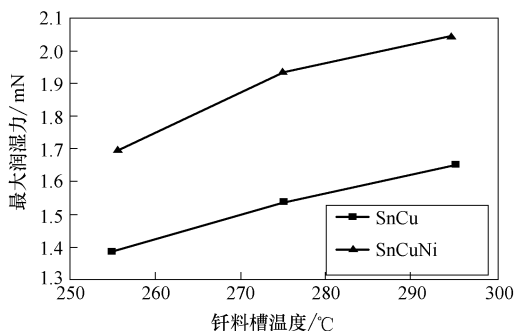


图 3-4-37 Sn-0.7Cu-0.3Ni 钎料、Sn-0.7Cu 钎料最大润湿力比较

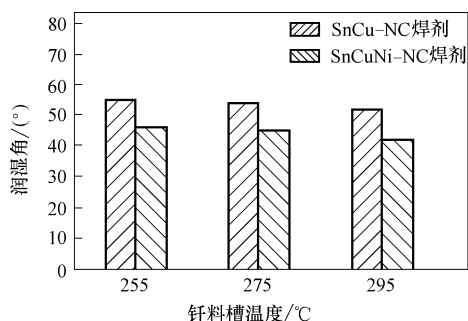


图 3-4-38 Sn-0.7Cu-0.3Ni 钎料、Sn-0.7Cu 钎料润湿角比较

图 3-4-39 所示为几种无铅钎料达到 2/3 最大润湿力的润湿时间比较。结果表明：SnCuNi 合金的润湿时间最短，当在 SnCuNi 合金中添加微量的 Ge 时，SnCuNi 合金的润湿时间进一步减少，加微量 P 时润湿时间却增加。

图 3-4-40 为采用润湿平衡法测试的 Sn-0.7Cu-0.05Ni 钎料和其他两种钎料对 Cu 的溶解速率比较（温度为 300℃，钎剂为 RMA）。可以看出，Sn-0.7Cu-0.05Ni 钎料和 Sn-37Pb 溶解 Cu 的能力差不多，但 Sn-3.0Ag-0.5Cu 在这样的温度条件下，溶解速度是非常快的。也有资料表明，在波峰焊的温度（250 ~ 260℃）条件下，Sn-0.7Cu-0.05Ni 钎料的溶解速率大幅低于 Sn-0.7Cu 钎料。

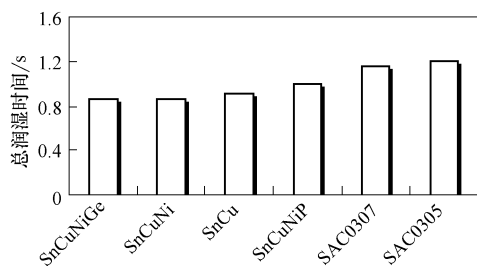


图 3-4-39 几种无铅钎料的润湿时间比较

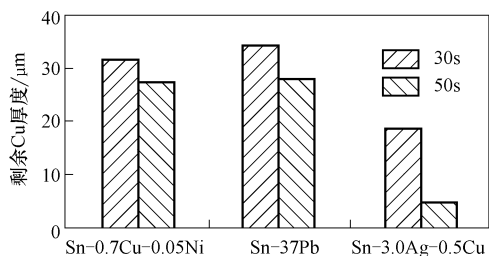
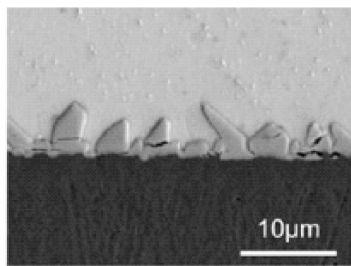
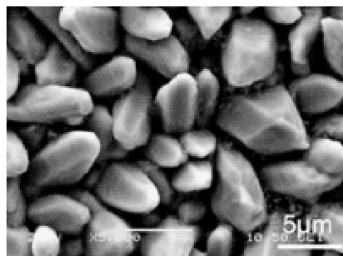


图 3-4-40 Sn-0.7Cu-0.05Ni 钎料的溶解速率比较

与 Sn-0.7Cu 钎料相比，当用 Sn-0.7Cu-0.05Ni 钎料钎焊 Cu 时的界面金属间化合物 IMC 不同，因此有必要对界面 IMC 在钎焊及焊后时效的生长规律进行研究。图 3-4-41、图 3-4-42 清楚表明了



a)



b)

图 3-4-41 Sn-0.7Cu BGA（球栅阵列）焊球 2 次回流时的界面形貌（250℃）

a) 界面形貌 b) IMC 形貌

界面和 IMC 的形貌。可以看出, 在 Sn-0.7Cu 钎料加微量的 Ni, 回流焊后的界面比较平滑, 界面 IMC 晶粒比较细小。EDX 能谱分析表明: Sn-0.7Cu-0.05Ni/Cu 界面反应时的 IMC 为 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 相。说明 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 相形核相对容易, 长大的趋势也比 Cu_6Sn_5 相小, 并且高温下较为稳定。

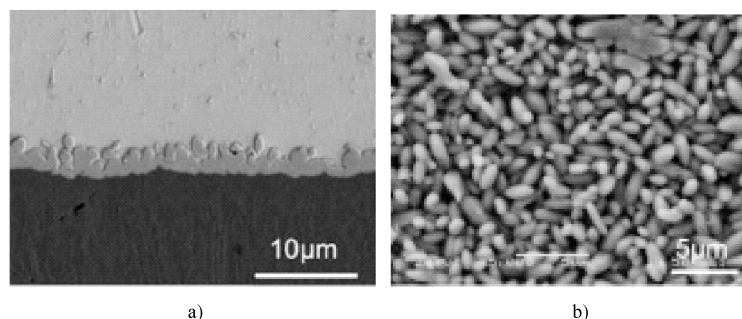


图 3-4-42 Sn-0.7Cu-0.05Ni BGA 焊球 2 次回流时的界面形貌 (250℃)

a) 界面形貌 b) IMC 形貌

Nishikawa 研究了在 150℃ 时效时界面 IMC 的生长动力学, 如图 3-4-43 所示。可以看出, 在 Sn-0.7Cu 钎料合金中添加质量分数为 0.05% 的 Ni, 可以明显阻止界面 IMC 的生长。图 3-4-44 所示为 BGA 球在回流焊条件下的剥离强度随剪切速度的变化。可以看出, 整体上说, Sn-0.7Cu-0.05Ni 焊球的剥离强度低于含 Ag 的焊球, 随着剪切速度的增加, 其差值逐渐减小, 说明 Sn-0.7Cu-0.05Ni 钎料合金抗跌落的性能相对优异。

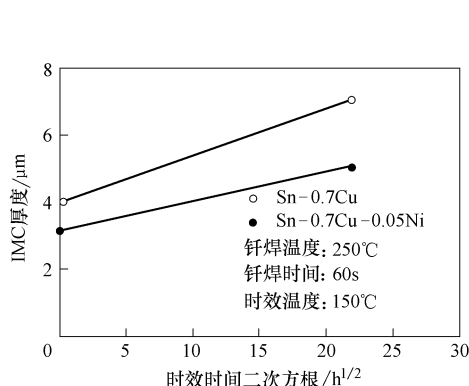


图 3-4-43 150℃ 时效时 Sn-0.7Cu-0.05Ni 和 Sn-0.7Cu/Cu 反应界面厚度比较

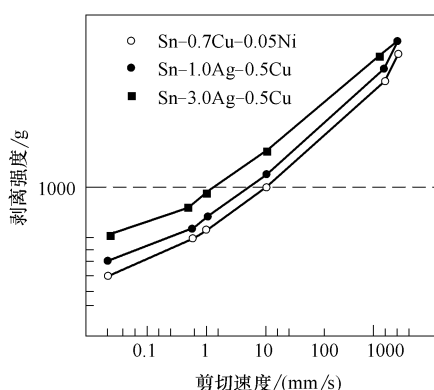


图 3-4-44 剪切速度对 BGA 焊点剥离强度的影响

Sn-0.7Cu-0.05Ni 钎料合金由于流动性好, 焊点表面质量优良, 成本低, 焊点力学性能较好, 越来越多地引起人们的研究兴趣, 并逐渐地应用于波峰焊的板级组装工艺中。

4.2.4 Sn-Zn、Sn-Zn-Bi 无铅钎料合金

Sn-Zn 钎料合金的熔点在无铅钎料中与 Sn-Pb 共晶钎料合金的熔点最为接近, 而且力学性能好, 原材料价格便宜, 其实用性在不断增加。但 Sn-Zn 基钎料存在许多不足, 如润湿性较差, 焊点耐蚀性较低等一系列问题, 这些问题都必将引起人们的研究兴趣。

图 3-4-45 所示为 Sn-Zn 合金的二元合金相图, 可以看出, Sn-Zn 二元合金是标准的二元共晶合金。在 β -Sn 中可溶解少量的 Zn, 形成 β -Sn (Zn) 固溶体, 但 Sn 几乎不溶于 Zn 中。以 Sn 为溶剂原子不断添加溶质原子 Zn, 将不断降低合金的熔化温度。当 Zn 的质量分数等于 9% 时, 合金得到完全共晶的组织 β -Sn + Zn, 共晶温度为 198℃。在平衡凝固条件时, Zn 以针状分布在 β -Sn 基体上,

如图 3-4-46 所示。Sn 和 Zn 不会反应，都是以单质元素存在，如果 Zn 的质量分数继续增加，合金的熔化温度将大大增加。因此作为钎料合金，一般 Zn 的质量分数都选择为 9% 或以下。在 Sn 中加入 Zn 可使合金的强度指标提高，但塑性指标降低。

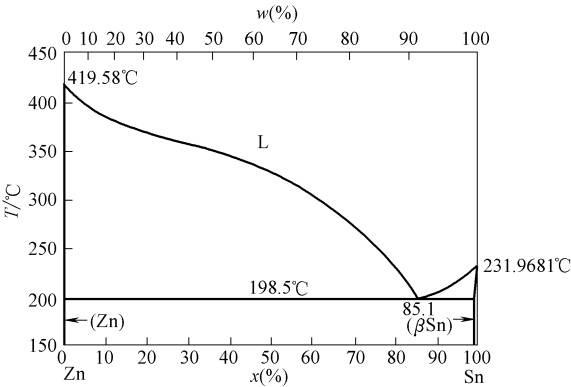


图 3-4-45 Sn-Zn 二元合金相图

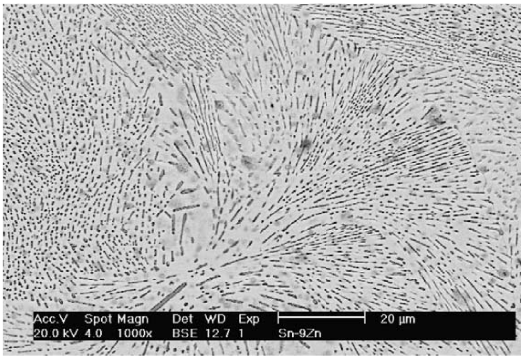


图 3-4-46 Sn-9Zn 合金显微组织

在 Sn-Zn 系合金中添加 Bi 不会形成特别的金属间化合物，Bi 可使熔化温度降低，同时使合金硬度增加，不应该添加过多，一般添加量为 3% (质量分数)。添加 Bi 使共晶点向低 Zn 侧迁移，如图 3-4-47 所示，目前公认的可作为钎料使用的配方为 Sn-8Zn-3Bi。

表 3-4-6 为 Sn-9Zn 钎料和 Sn-37Pb 钎料的物理性能比较。可以看出，两者电阻率相差不大，但热导率却相对较高，热膨胀系数也比 Sn-37Pb 要大，但这些差别都不是太大。最为显著的是 Sn-9Zn 的表面张力大大超过 Sn-37Pb，因此钎焊时的润湿铺展性大大低于 Sn-38Pb 钎料合金，这是造成 Sn-9Zn 钎焊工艺性能不好的主要原因。

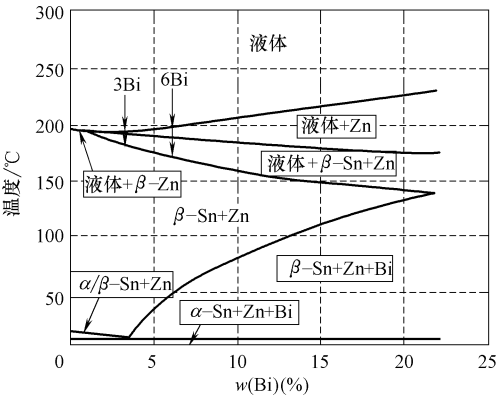


图 3-4-47 Sn-Zn 合金中添加 Bi 时的垂直截面 (计算)

表 3-4-6 Sn-9Zn 钎料合金的物理性能

性能	密度 /(g/cm ³)	电阻率 /(μΩ·cm)	热导率 /[W/(m·K)]	比热容 /[J/(g·K)]	热膨胀系数 /(10 ⁻⁶ /K)	表面张力(空气中) /(N/m)
Sn-9Zn	7.27	15	61	0.239	23.9	518
Sn-38Pb	8.4	14.5	50.9	0.167	16.8	417

表 3-4-7 为 Sn-9Zn 钎料合金和 Sn-38Pb 钎料合金的力学性能比较。从表 3-4-7 可以看出，和 Sn-38Pb 钎料合金相比较，Sn-9Zn 钎料合金由于 Zn 的加入，合金的强度指标大幅提高，塑性指标大幅降低。从 Sn、Zn、Pb 的晶体结构分析：Sn 为体心立方结构，Zn 为密排六方结构，Pb 为面心立方结构，因此 Zn 的强化作用大于 Pb。Pb 加入到 Sn 中并不能使 Sn 基体得到强化，反而使其塑性指标提高，这就是 Sn-Pb 基钎料合金塑性好的原因。它们可以组成任意的 Sn 和 Pb 的组合作为钎料使用，在共晶范围内熔化温度变化也不是太大。

Zhou 等研究了 Sn-9Zn 钎料的润湿性及添加 Bi 的影响并和 Sn-40Pb 钎料进行了比较，如图 3-4-48 所示，在 240℃，采用松香钎剂时，Sn-9Zn 钎剂的润湿铺展面积远小于 Sn-40Pb 钎料。随着 Bi 含量的增加，润湿性得到改善，但还是远低于 Sn-Pb 钎料，这表明 Sn-Zn 基钎料的润湿铺展性是比较差的。

表 3-4-7 Sn-9Zn 钎料力学性能

性能	抗拉强度/MPa	伸长率(%)	硬度 HV	断裂能量/J
Sn-9Zn	83	30	21.8	2.37
Sn-38Pb	54	155	12.8	6.5

Loomams 等人在相同试验条件下，温度为 250℃ 时，测得 Sn-9Zn 钎料的润湿角为 59°，Sn-3.5Ag 的润湿角为 38°，说明 Sn-Zn 基钎料的润湿性在现阶段的所有无铅钎料中最差的。它不仅远低于传统的 Sn-Pb 钎料，而且低于现有的 Sn-Ag、Sn-Cu 无铅钎料，这和 Zn 的化学活性较大及界面反应产物的影响有关。因此研究适合 Sn-Zn 基钎料的专用钎剂显得尤为重要。

Shohji 等人研究了应变速率和温度对 Sn-8Zn-3Bi 钎料的力学性能的影响，并和 Sn-37Pb 钎料进行了比较，如图 3-4-49、图 3-4-50 所示。结果表明：随着应变速率的增加，Sn-8Zn-3Bi 钎料的抗拉强度增加，增加趋势和 Sn-37Pb 钎料增加的趋势基本相同。伸长率降低，但 Sn-37Pb 钎料降低的趋势大于 Sn-8Zn-3Bi 钎料，这说明 Sn-8Zn-3Bi 钎料的伸长率对应变速率不敏感。随着温度的增加，抗拉强度下降，伸长率增加。在 -40℃ 时 Sn-8Zn-3Bi 钎料的抗拉强度达到 120MPa，远超过 Sn-37Pb 钎料，120℃ 时的强度差就比较小了。和 Sn-37Pb 钎料比较，Sn-8Zn-3Bi 钎料伸长率随温度的变化较小。

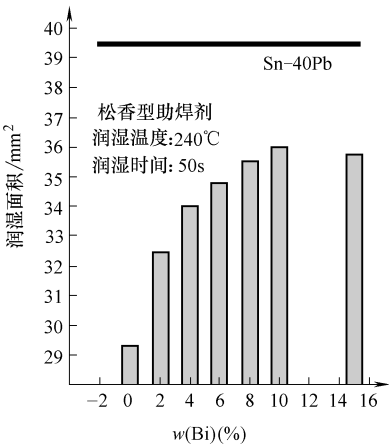


图 3-4-48 Bi 含量对 Sn-9Zn 钎料铺展面积的影响

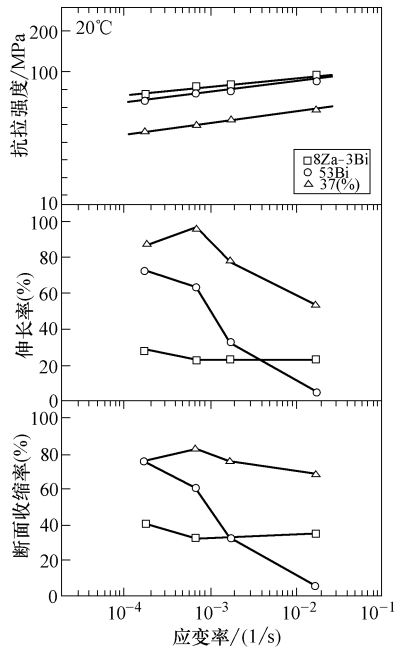


图 3-4-49 应变速率对 Sn-8Zn-3Bi 钎料力学性能的影响

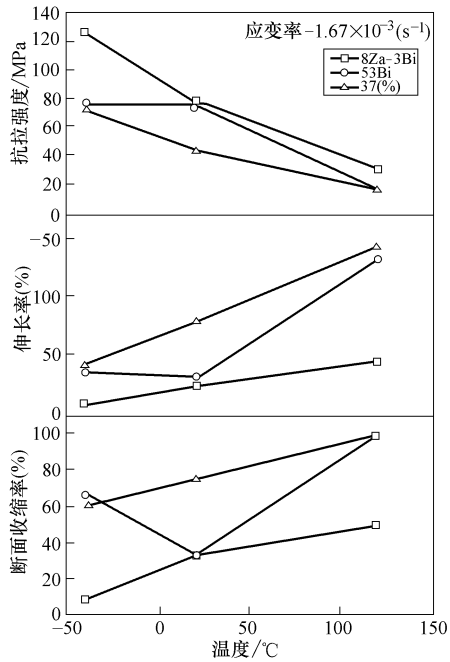


图 3-4-50 温度对 Sn-8Zn-3Bi 钎料力学性能的影响

蠕变试验的结果为：Sn-8Zn-3Bi 钎料在高载荷时蠕变特性和 Sn-3.5Ag 钎料合金相同，在低载荷时和 Sn-0.7Cu 钎料合金相同，Sn-8Zn-3Bi 钎料的蠕变性能好于 Sn-37Pb 钎料。

Sn-Zn 基钎料合金由于 Zn 是以单质的形式存在于焊点, 并且活性较高, 因此焊点的耐蚀性一直是人们关心的问题。Suganuma 等人研究了 Sn-9Zn、Sn-8Zn-3Bi 钎料合金在高温、高湿环境下焊点的耐氧化腐蚀性 (图 3-4-51)。在高温、高湿环境中 ($85^{\circ}\text{C}/85\% \text{RH}$, 1000h), Sn-Zn 基钎料合金中的 Zn 将会氧化, 形成 ZnO。ZnO 的出现位置主要在焊点表面及钎料和 IMC 的交界面。随着时间的延长, ZnO 的厚度增加, 当钎料合金中含 Bi 时, 加剧 Zn 的氧化。这是由于添加 Bi 导致初生的 Zn 和共晶反应时的 Zn 相更加粗大所致, 因此 Sn-Zn 基钎料的高温、高湿环境腐蚀是其应用的一大障碍。

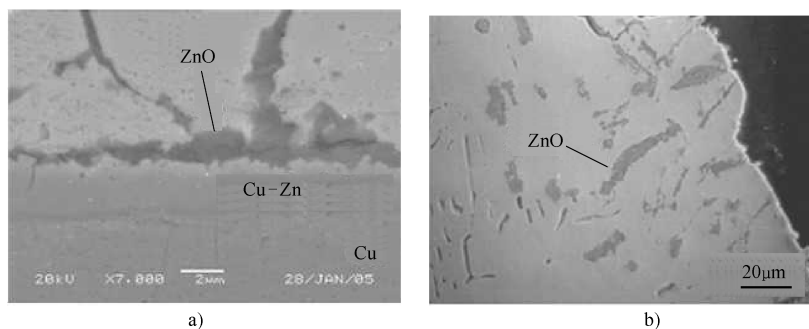


图 3-4-51 Sn-8Zn-3Bi 焊点氧化后形貌 ($85^{\circ}\text{C}/85\% \text{RH}$, 1000h)

a) 焊点界面 b) 焊点表面

总之, Sn-Zn 基钎料由于有低的熔化温度、好的经济性 & 综合力学性能一直以来备受人们的关注, 通过研究合适的钎剂来提高钎料的润湿性、通过合金化改善钎料的耐蚀性和界面的可靠性是今后研究的重点。

4.3 无铅钎焊用钎剂简介

由于金属表面存在氧化物, 氧化物的存在将阻碍钎料的润湿铺展, 从而影响钎缝的成形。在软钎焊时, 一般只有通过化学反应才能去除氧化物, 因此钎剂对于钎缝的形成至关重要。钎剂的两个主要功能如下:

- 1) 去除基体金属和钎料表面氧化膜, 并且保持表面处于清洁状态。
- 2) 改善液态钎料对母材表面的润湿能力。

为了达到上述作用, 钎剂必需满足以下要求:

(1) 化学活性 在钎焊温度下, 钎剂应具有足够的活性, 通过化学反应来溶解或破坏母材和钎料表面的氧化膜, 并且反应产物能溶解进入钎剂或上浮到焊点表面, 不会在钎缝中形成钎焊缺陷。

(2) 热稳定性 一旦化学反应发生, 钎剂还必须继续提供一层保护膜来防止清洁表面的氧化, 因此要求钎剂在钎焊温度下是稳定的, 不会因蒸发、分解、碳化而丧失作用。如松香在 285°C 将分解、碳化, 失去钎剂的作用。一般希望钎剂具有不小于 100°C 的热稳定温度范围。

(3) 活性温度范围 在活性温度范围, 钎剂去除氧化物的能力最强, 超出活性温度范围, 钎剂将失去作用。一般来说, 钎剂的活性温度范围低于钎料熔化温度 $10 \sim 30^{\circ}\text{C}$, 活性温度范围上限要高于钎料的熔化温度, 因此在钎焊温度下, 钎剂都处于活性状态。故一般希望钎剂的熔化温度不宜与钎料的熔化温度相差太大。

(4) 润湿、铺展性 在钎焊温度范围, 熔化的钎剂应该粘度小, 流动性好, 能很好地润湿母材和减小液态钎料与母材的界面张力。当钎剂熔化时, 钎剂对母材应有好的润湿能力, 当钎料熔化

时,液态钎料能容易地替换母材上的钎剂,促进液态钎料的铺展。

(5) 电化性 如果钎剂中包含无机化合物的金属离子,在电动势的作用下,金属离子沉积在接头表面,增强钎料的润湿性,促进钎缝形成。

4.3.1 钎剂的组成及分类

1. 钎剂的组成

钎剂可能是单一物质,也可能是多组分的复杂系统,一般钎剂的组成大致可分为基体组分、去膜剂、活性剂等。

(1) 基体组分 使钎剂具有需要的熔化温度,作为钎剂其他组分及钎剂作用产物的溶剂。在铺展时形成致密的液膜,覆盖在母材和钎料表面上,防止接头区的进一步氧化。软钎焊时一般为高沸点的有机溶剂。

(2) 去膜剂 通过物理或化学过程溶解、除去、破碎母材和钎料表面的氧化膜,使得熔化的钎料能够润湿洁净的母材表面。

(3) 活性剂 有时氧化膜溶解相当缓慢,为加速氧化膜的清除、进一步降低界面张力,以改善钎料的铺展,添加适当的活性物质。

2. 电子用钎剂的分类

在微电子封装行业,无铅钎焊技术使用的主要是有机软钎剂,这类钎剂的组成主要有以下方面:

- 1) 有机酸:乳酸、硬脂酸、水杨酸、油酸等。
- 2) 有机胺盐:盐酸苯胺、磷酸苯胺、盐酸胍、盐酸二乙胺等。
- 3) 胺和酰胺类有机物:尿素、乙二胺、乙酰胺、三乙醇胺等。
- 4) 天然树脂:主要是松香类的钎剂。

按活性可分为:R级(无活性)、RMA级(中活性)、RA级(高活性)、RSA级(超活性)。

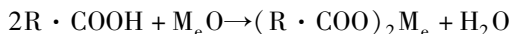
按传统化学成分可分为松香型“R”、水溶型“WS”、低固体型/无VOC“LS”。

按钎剂中的固体含量(质量分数)可分为:低固含量=2%~3%、中固含量=5%~10%、高固含量>15%。

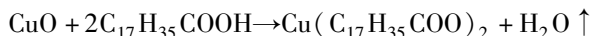
4.3.2 电子用钎剂的作用机理

1. 有机酸的去膜机理

主要是依靠羧基的作用,以金属皂的形式除去母材和钎料的表面氧化膜。它们与金属氧化物的反应通式可表述为:



例如,以硬脂酸作钎剂,用Sn基钎料钎焊Cu时,首先,硬脂酸与氧化铜发生反应,清除了氧化膜。



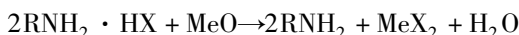
市场的硬脂酸铜为绿色晶体,熔点为220℃。随后,硬脂酸铜发生热分解,在分解过程中从系统中取得氢,重新聚合成硬脂酸,析出活性铜,它溶入钎料中,促进钎料的铺展:



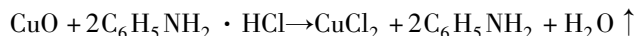
新生成的硬脂酸可以再与氧化物作用。这个过程实质上是发生在钎料-钎剂-母材界面的一种多相络合催化反应。

2. 有机胺盐的去膜机理

有机胺盐均为呈碱性的胺、胍等与酸生成的可溶性盐。在钎焊加热过程中，它们分解为碱性和酸性两部分，析出的酸与氧化物作用而清除它们，其反应通式为



例如，以盐酸苯胺为钎剂钎焊 Cu，其去膜过程为



生成的 CuCl_2 能再与盐酸苯胺反应：



生成的四氯苯胺铜能起活性剂的作用，促进钎料在 Cu 上的铺展。有机胺盐作为钎剂的一个特点是，在钎焊后的冷却过程中，剩余的酸又与其碱性的胺结合，减轻了残渣的腐蚀性。

3. 胺及酰胺的去膜机理

在钎焊过程中，胺及酰胺类碱性或中性有机物能与 Cu^{2+} 离子形成胺铜配位化合物，达到去膜的目的。随后这些胺铜配位化合物在加热过程中可能热分解，析出活性铜，它与钎料、母材相互作用，减小液-固界面张力，促进钎料的铺展。这类物质的活性不如有机胺盐，但它们的残渣腐蚀性也不大。

4. 松香类钎剂的去膜机理

松香是一种天然树脂，一般呈浅黄色，经过加热、蒸馏、去除固体颗粒等工艺加工而成。其组成为松香酸 ($\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{COOH}$) 为 75% ~ 80% (质量分数)，d-海松香酸、l-海松香酸各占 10% ~ 15% (质量分数)。常温时为固体，具有电绝缘性、耐湿性和无腐蚀性的特点；它不溶于水，可溶于酒精、丙酮、甘油等；它是一种多组分的均质材料，有单一的熔点，在 127℃ 熔化，在高于 150℃ 的温度下表现出溶解 Ag、Cu、Sn 等氧化物的能力。松香的钎剂作用在于所含的松香酸，去膜机理属有机酸一类。但是松香酸是弱的有机酸，溶解氧化物的能力不强，为了提高松香钎剂的去膜能力，可添加活性剂，这样配成的钎剂称为活性松香钎剂。

由于天然松香质量不稳定，无法精确规定其酸值，因此不易控制其活性，目前人们趋向于研制成分稳定的合成松香。

目前，由于 CFC 的禁用使得人们把钎剂的研制转移到水洗钎剂和免洗钎剂上。水洗钎剂主要是以高沸点的溶剂为基础加上水溶性有机酸、胺等作为活性剂，其活性高于传统的 RMA 钎剂，也大大高于低固含量的免洗钎剂。水洗钎剂的可靠性取决于水清洗钎剂残渣的“干净”程度。免洗钎剂具有较低的固体含量，焊后无需清洗，主要以有机酸作为活性剂，有时也会有胺的存在。免洗钎剂的固体含量一般为 2% ~ 5% (质量分数)，更低的达 1% ~ 3% (质量分数)，溶剂为高沸点的有机溶剂，但这类钎剂的活性一般较低，在氮气保护条件下钎焊才会有较好的效果。近年来，由于考虑钎剂中溶剂的挥发对环境的危害和人体自身健康的影响，材料成本的压力和水基的安全性，人们又开始了水基型钎剂的研究。水基型钎剂的基体组分为水，添加活化剂、成膜剂等各种添加剂，也可分为清洗和免清洗两类，现阶段还处于研究之中。

4.4 无铅钎焊方法及设备

对于电子行业组装的无铅钎焊技术，在这里主要讨论大批量生产的自动钎焊技术，即波峰焊和回流焊，手工烙铁焊、浸焊等由于基本原理相同，不再多叙。与传统的 Sn-Pb 钎料钎焊技术相比，由于现有的无铅钎料的熔化温度较高，一般比 Sn-37Pb 钎料高出 40℃ 左右，因此这就决定了无铅钎焊技术需要更高的钎焊温度，这必将对设备、电子元器件和印制电路板的耐热性提出更高要求。另一方面，从前面的讨论可知，所有无铅钎料的润湿性都低于 Sn-37Pb 钎料，为了达到同样的

焊点质量,这就需要对钎焊参数有更严格的控制,即所谓的工艺窗口窄,同时钎剂的固体含量有可能增加。因此和原来的有 Pb 钎焊相比,无铅化对电子组装行业钎焊技术提出了更高的技术要求。

4.4.1 无铅波峰焊

1. 波峰焊工艺方法

波峰焊是借助于机械泵,使液态钎料不断垂直向上地朝狭长出口涌出,形成 20~30mm 高的波峰。钎料波以一定的速度和压力作用于印制电路板上,借助毛细力的作用,渗入到待钎焊的器件引线 and 电路板组成的间隙中,而形成焊点。波峰焊主要应用于通孔组装技术的元器件的钎焊,SMC/SMD 通过点胶固化后,也可采用波峰焊技术来形成焊点。波峰焊工艺过程可分为涂敷钎剂、预热、钎焊、冷却等几个阶段(图 3-4-52)。

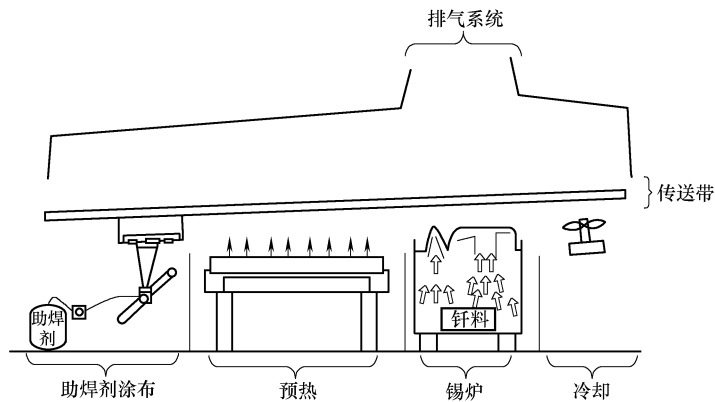


图 3-4-52 波峰焊原理示意图

波峰焊钎剂的涂敷方法有如下几种:

(1) 发泡法 发泡法是在液态钎剂槽内放入一根管状多孔陶瓷,通过接入压缩空气产生的压力,迫使钎剂从陶瓷管的小孔流出并产生均匀的微小泡沫。当 PCB 板焊接面经过喷嘴时,它就均匀地附着上钎剂,完成钎剂的涂敷,如图 3-4-53 所示。钎剂的涂敷质量主要与陶瓷管微孔的均匀性即钎剂的密度有关。

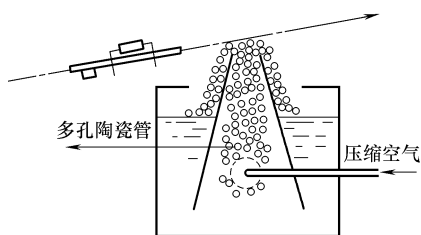


图 3-4-53 发泡法涂敷钎剂示意图

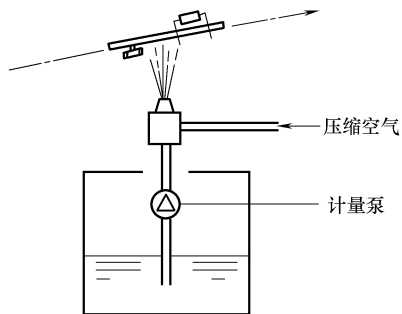


图 3-4-54 压力雾化涂敷钎剂示意图

(2) 喷雾法 喷雾法是通过施加压力或机械振荡,使钎剂雾化并从喷嘴中喷出,雾化的钎剂到达电路板,形成均匀的钎剂涂敷。根据雾化的方式不同,又有超声雾化、压力雾化和网刷雾化等方法,如图 3-4-54 所示。

(3) 浸渍法 就是把 PCB 板焊接面直接浸入到液态钎剂中,但钎剂不能浸到元器件表面。钎剂存放在上部开口的容器内,不用时必须加盖,以免钎剂中的溶剂挥发。

(4) 刷涂法 用一个圆形毛刷,其下端与钎剂接触,上端与 PCB 板待钎焊面接触,当毛刷旋转时,就将钎剂涂到板上。该法不适应带有通孔的 PCB 板。

一般来说,钎剂的涂敷量可这样考虑,钎剂的密度通常为 $0.8 \sim 0.85 \text{ g/cm}^3$,固体含量为 $1.5\% \sim 10\%$ (质量分数)。根据使用的钎剂种类,钎焊时需要的固态钎剂量为 $0.5 \sim 3 \text{ g/cm}^2$,相当

于钎剂层的厚度为 $3 \sim 20 \mu\text{m}$ 。另外,在整个 PCB 板的焊接面,钎剂一定要均匀分布。

当电路板焊接面完成了钎剂的施加后,应对其预热,使钎剂中的大部分溶剂及 PCB 板制造过程中存在的水分挥发;同时预热可降低钎焊期间对元器件和 PCB 板的热冲击,通常的预热温度为 $90 \sim 110^\circ\text{C}$ 。预热的方法有红外加热和热风对流加热,红外加热的优点是节能降耗,升温速度快,热风对流加热则加热均匀,热量传递高效。

焊接区主要由锡炉和波峰发生器组成,锡炉用来熔化钎料,波峰发生器可使锡炉中的液态钎料通过泵的作用,经过导流板、喷头喷出液态波峰。当液态钎料波以一定的速度和压力和电路板接触,最后形成焊点。根据元器件的组装形式及保证钎焊质量考虑,出现了不同类型的波峰结构,如 λ 波、T 形波、 Ω 波和双波峰等。

双波峰焊可参见本篇 2.5.2 节中图 3-2-15,已在插贴混装印制电路板上广泛应用,其缺点是印制电路板经过两次波峰,受热量较大,一般耐热性较差的电路板易变形翘曲。

2. 波峰焊钎焊参数

波峰焊时的钎焊参数的选择正确与否,直接决定波峰焊 PCB 板的钎焊质量,而钎焊参数受许多复杂因素的影响。

(1) 传送倾角 传送倾角对钎焊质量有明显影响,特别是在钎焊高密度 SMC/SMD 时。倾角太小,可导致 SMC/SMD “阴影区”出现桥连;倾角过大,虽然有利于桥连的消除,但焊点挂锡太少,容易产生虚焊。适当的倾角,还有利于液态钎料与 PCB 板更快地剥离,使之返回锡炉中。一般倾角应控制在 $3^\circ \sim 7^\circ$ 。

(2) 钎剂涂敷量 在 PCB 板焊接面上涂敷的钎剂要均匀分布,数量适中。采用刷涂与发泡方式时,由于溶剂的挥发,必须随时检查、调整钎剂的密度;采用喷射方式时,要能准确控制喷雾量,应经常清理喷头,防止喷射孔堵塞。只有钎剂施加量保持恒定,才能保证质量的稳定性。

(3) 预热温度 预热的作用是使钎剂中的溶剂挥发,以免 PCB 板通过液态钎料时,产生钎焊缺陷;另一方面,可避免对 PCB 板产生大的热冲击,导致翘曲变形。一般预热温度控制在 $90 \sim 130^\circ\text{C}$,预热时间 $1 \sim 3 \text{min}$ 。

(4) 波峰高度 波峰高度指的是波峰焊时 PCB 板浸入钎料峰的深度,通常控制在板厚的 $1/2 \sim 1$ 之间。过大的浸入深度会导致钎料流到 PCB 板的表面,造成桥连。另一方面,PCB 板浸入钎料越深,其对钎料的挡流作用越大,加上元件引脚的作用,扰乱钎料的流动速度分布,不能保证 PCB 板与钎料流的零速运动。

(5) 钎焊温度和保温时间 钎焊温度和保温时间是保证钎焊质量的最关键因素。钎焊温度过低,钎料的黏度大,钎料的润湿、铺展性能变差,产生虚焊、拉尖、桥连等缺陷;钎焊温度过高,会造成钎料流失,焊点不饱满、焊点氧化变色,甚至钎剂碳化失去活性等问题。

在温度设定的情况下,保温时间应和温度有一个匹配,以保证输入的热量稳定,从而得到稳定的钎焊质量。波峰焊时的保温时间是通过调整传送带的速度来控制的,因此要综合考虑预热温度、钎焊温度、传送带速度等因素的影响。一般钎焊温度控制在 $250^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$,保温时间为 $3 \sim 4 \text{s}$ 。

波峰焊时的温度-时间工艺曲线如图 3-4-55

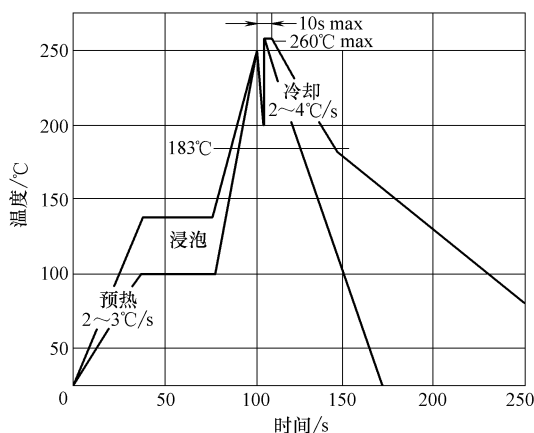


图 3-4-55 波峰焊时的温度-时间工艺曲线

所示。通过对温度-时间工艺曲线的分析,可对整个波峰焊过程的参数进行监控,为质量控制及缺陷产生原因的分析提供帮助。

3. 无铅波峰焊面临的问题

无铅钎料和 Sn-Pb 钎料相比,其最显著的特点就是由于不含 Pb,钎料的熔化温度升高,润湿性变差,这将导致钎焊温度的增加,对 PCB 板、元器件的耐温性提出了考验。钎剂的施加量增加或活性提高,对焊后清洗要求提高,对免清洗钎剂提出了新的要求。其次无铅钎料的含 Sn 量高于 Sn-Pb 钎料,对锡炉、喷嘴、机械泵等零部件的热侵蚀将更加严重。并且由于钎焊温度的增加,来自焊盘、焊脚的 Cu 的溶解增加,锡炉中的钎料流动性降低,所形成的金属间化合物沉入锡炉底部,造成机械泵损坏,同时锡渣增加,这些都是无铅波峰焊时要面临的问题。因此人们提出了在氮气保护条件下进行波峰焊,但这将使加工成本上升。

4.4.2 无铅回流焊

1. 无铅回流焊工艺方法

回流焊工艺的出现是随着组装工艺从通孔技术 (THT) 向表面组装技术 (SMT) 发展紧密相连的,它适应了更高密度组装的要求。回流焊使用钎料膏 (又称锡膏) 作为连接材料,通过印制或滴注等方法将钎料膏涂敷在印制电路板的焊盘上,用贴片机把贴装元件放置在钎料膏上,然后加热使钎料膏熔化,使其再次流动,从而实现连接,如图 3-4-56 所示。为了对回流焊有深入的了解,下面将对整个 SMT 工艺及钎料膏进行全面的讨论。

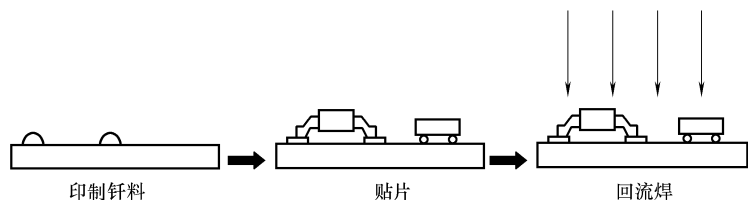


图 3-4-56 回流焊时 SMT 工艺流程图

(1) 钎料膏 钎料膏是在 SMT 工艺中得以广泛应用的连接材料。它是由钎料合金粉、糊状钎剂和某些各种添加剂按一定比例均匀混合而成的膏状体。有一定的黏性和良好的触变特性,即在剪切力作用下黏度减小以利于印制,而印制之后黏度恢复,从而在回流焊之前起到固定元器件的作用。当钎料膏被加热到一定温度时,随着溶剂的挥发,在钎焊温度下,钎料合金粉熔化、润湿,使被焊元器件与焊盘互连在一起,冷却后形成永久连接焊点。

通常钎料膏可按以下性能分类。

1) 钎料合金粉的熔化温度:如常用的 Sn-Pb 钎料的熔化温度为 $183 \sim 190^{\circ}\text{C}$ (又可称为有铅钎料膏); Sn-Ag 或 Sn-Ag-Cu 钎料,熔化温度为 $217 \sim 225^{\circ}\text{C}$,还有 Sn-Bi 低温钎料膏,及其他高温钎料膏等。可根据钎焊时所需要温度的不同,选择不同熔化温度的钎料膏。

2) 钎剂的活性:可参照钎剂活性的分类原则,分为低活性 (R)、中等活性 (RMA) 和高活性 (RA),可根据 PCB 和元器件的情况和工艺要求进行选择。

3) 清洗方式:分为有机溶剂清洗、水清洗及免清洗等方式。从环保的角度考虑,水清洗和免清洗是发展主流。

衡量钎料膏中钎料合金粉末的质量标准主要有粒度、球形度和氧含量。粉末粒度的分类见表 3-4-8,球形度的要求为 1.07,氧含量为 $15 \times 10^{-5}\%$ (质量分数)。另外钎料膏应存放在 $3 \sim 10^{\circ}\text{C}$ 的冰箱内,使用前在未开封的情况下,应在室温放置 4h 以上,以使钎料膏的温度自然回升到室温。开封后,要先对钎料膏进行搅拌以保证钎料膏中的各组成成分均匀。钎料膏从施加到 PCB 上至贴

装元器件之前的不失效时间，一般要求为 12 ~ 24h，有时需达 72h。一般要求在 2 ~ 5℃ 下的存储寿命为 3 ~ 6 个月。

表 3-4-8 钎料合金粉的粒度分布要求

类型	不大于/ μm	只有小于 1% 的部分大于/ μm	最少有 80% 位于其中/ μm	最多有 10% 的部分小于/ μm
1	160	150	150 ~ 75	20
2	80	75	75 ~ 45	20
3	50	45	45 ~ 25	20
4	40	38	38 ~ 20	20
5	30	25	25 ~ 15	15
6	20	15	15 ~ 5	5

一般钎料膏中合金粉与钎剂的通用配比为：钎料合金含量为 85% ~ 90%（质量分数），钎剂为 15% ~ 10%（质量分数），或合金含量为 50% ~ 60%（质量分数），钎剂为 40% ~ 50%（质量分数）。有时根据需要，钎剂的含量可达 20%（质量分数）。一般而言，合金粉含量高，钎料膏不易塌落，钎焊时钎剂残留物减少，但印制比较困难，钎焊工艺要求更需严格。合金粉含量低，印制性能好，润湿性好，但缺点是易塌落，焊后钎剂残留物增加。

(2) 钎料膏的印制 将钎料膏涂敷于焊盘表面的最常用方法是印制。滴注法由于效率低，只在特殊场合应用。印制方法中丝网印刷方式也逐渐淘汰，目前最为常用的是金属模板印制方法。

金属模板一般选用不锈钢，模板厚度与开口尺寸直接关系到钎料膏印刷质量。开口设计的主要参数为

宽厚比 = 开口宽度 / 模板厚度 = W/T

面积比 = 开口面积 / 开口孔壁面积 = $(L \times W) / 2 \times (L + W) \times T$

式中 L 、 W 、 T ——分别为开口的长、宽、厚（即模板厚度），mm。

从上式可以看出，宽厚比、面积比越大，越容易脱模，即焊盘对钎料膏的拉力大于开口孔壁对钎料膏的剪切力。一般要求宽厚比 > 1.5，面积比 > 0.66。开口加工方法有化学腐蚀法、激光切割法和电铸法。表 3-4-9 为元器件引线节距与模板厚度的关系。

表 3-4-9 元器件引线节距与模板厚度的关系

节距/mm	厚度/ μm	节距/mm	厚度/ μm
< 0.625	150 ~ 175	0.4	100 ~ 125
0.5 ~ 0.625	125 ~ 150	0.3	75 ~ 100

钎料膏的印制过程如图 3-4-57 所示，刮刀倾斜一定的角度、施加一定的压力、以一定的速度

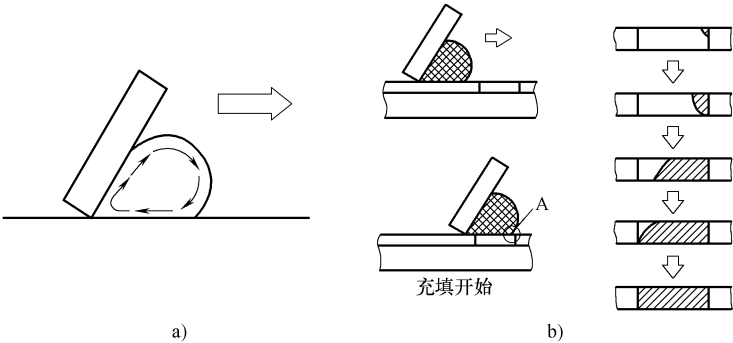


图 3-4-57 钎料膏印制过程示意图
a) 滚动状态 b) 实际充填状态

推动钎料膏进入模板的开口。一般刮刀角度设定为 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ，单位长度上的压力为 5N/mm ，速度选择可在 $12 \sim 40\text{mm/s}$ 之间。刮刀材料通常由聚氨酯橡胶或金属制成。

(3) 贴片技术 贴片是指用一定的方式将片式元器件准确地贴放到 PCB 指定的位置上。它包含了两个动作，即拾取与放置，这样的工作可由贴片机来实现高速、高精度地贴放元器件。目前先进的贴片机贴片速度可达 8片/s ，贴片精度为 $\pm 60\mu\text{m}$ 。

(4) 回流焊

1) 红外回流焊：红外回流焊已成为主流的回流焊方法，它是用发射单元发射的红外线作为热源来加热元器件、电路板和周围的空气的，这和红外线的波长有关。对于近红外线来说，其波长一般在 $1 \sim 2.5\mu\text{m}$ ，此时的红外线能量大部分可被焊件吸收，空气吸收产生对流加热的红外热量不足 5% 。但由于表面贴装元器件的表面颜色的深浅及体积大小不一、材料的差异及与热源的距离不同，因此所吸收的热量也不同，造成温度的不均匀。而当红外辐射波长处于红外波长的中间区 ($2.5 \sim 5\mu\text{m}$)，约有 40% 的热量辐射到被钎焊的元件上，其余 60% 的热量则由炉内的热空气通过对流来提供。基于这样的原理，红外回流 + 强制热风对流回流焊由于加热速度快、加热元器件温差小，在无铅回流焊中得以广泛应用，其结构示意图如图 3-4-58 所示。

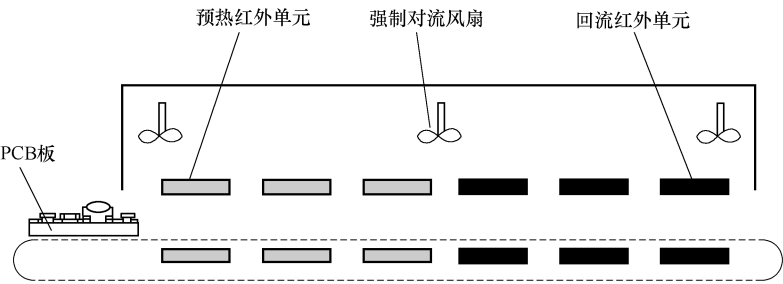


图 3-4-58 红外回流 + 热风对流焊结构示意图

2) 回流焊温度-时间曲线：对于回流焊的整个过程，可以通过回流焊温度-时间曲线来进行分析。图 3-4-59 所示为典型的回流焊温度-时间曲线，整个过程按照时间进程，可分为 4 个阶段，其功能简述如下：

① 预热区：指由室温升至 $120 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 的区域，升温速度一般为 $1 \sim 3^{\circ}\text{C/s}$ 。该段可使 PCB 和元器件预热，钎料膏中的溶剂缓慢挥发，以防止钎料膏塌落、钎料飞溅及元器件的损伤。

② 保温区：指温度维持在 150°C 至钎料熔化温度之间的区域，通常时间为 $60 \sim 120\text{s}$ 。该段主要是为了保证 PCB 及其要组装的元器件在进入回流焊前的温度尽可能均匀，小的元器件由于热得快，因此要把温度降下来，大的元器件热得慢，要把温度升上去。同时，钎料中的活化剂开始作用，在一定程度上去除氧化膜，准备回流熔化。

③ 回流区：指温度超过钎料熔化温度的区域，对于 Sn-Pb 钎料，常用温度为 $210 \sim 225^{\circ}\text{C}$ ，对无铅钎料，一般为 $230 \sim 245^{\circ}\text{C}$ 。此时钎料开始熔化，在连接部位润湿、铺展，形成焊点，高温停留时间一般为 $60 \sim 120\text{s}$ 。影响焊点质量的关键因素是峰值温度和高温停留时间。

④ 冷却区：指冷却时温度低于钎料熔化温度的区域，此时，液态钎料发生凝固，形成焊点。

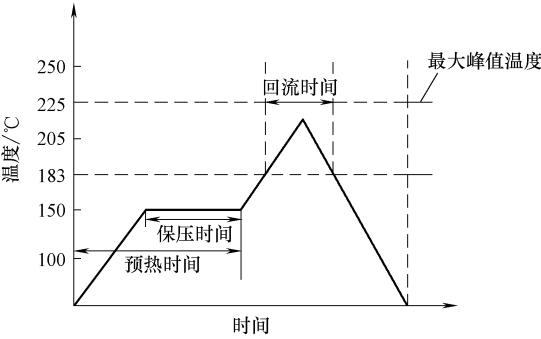


图 3-4-59 回流焊温度-时间曲线

冷却速度太大，可能造成较大的热应力；冷却速度过小，焊点晶粒长大，表面粗糙。

2. 无铅回流焊面临的问题

由于电子元器件耐热性的限制，回流焊的峰值温度一般不能超过 245℃，在 Sn-37Pb 有铅钎料的情况下，钎料熔化温度仅为 183℃，因此有 62℃ 左右的较宽的工艺窗口。但是在无铅钎料的情况下，如 Sn-3.5Ag 或 Sn-Ag-Cu 钎料合金，钎料的熔化温度为 220℃ 左右，此时的工艺窗口范围仅为 24℃ 左右。工艺窗口窄是无铅回流焊的主要技术难点。

经过大量的试验研究，如今许多国际组织对回流焊的温度曲线提出了推荐，见表 3-4-10。

表 3-4-10 国际组织推荐的无铅回流焊焊接参数

焊接参数	J-STD-020B	IEC60068-582CD	JEITA
预热温度 /℃	150 ~ 200	150 ~ 180	150 ~ 180
保温时间 /s	60 ~ 180	60 ~ 120	90 ~ 120
液相线以上温度 /℃	217	230	220
停留时间 /s	60 ~ 150	25 ± 5	30 ~ 60
峰值温度 /℃	250 ± 5	250	240 ~ 250
停留时间 /s	20 ~ 40	10 ± 1	10

以上参数对预热时的加热速度并没有明确的规定。从钎焊原理的理论出发，加热速度一定不会对钎料的性能产生影响，从而影响回流焊时的质量。一般而言，慢的加热速度有利于钎料中的溶剂的缓慢挥发，有利于元器件、PCB 的温度均匀，甚至可以增加钎料膏的黏度，减少元器件的坍塌。Lee 等人基于缺陷机理分析，研究了回流条件对焊点缺陷的影响。结果表明：慢的升温速度（0.5 ~ 1℃/s）、快的冷却速度（<4℃/s）可以得到最小的缺陷率，甚至可以取消预热时的保温时间。组装过程中被成功采用的优化回流焊温度线性上升曲线如图 3-4-60 所示。

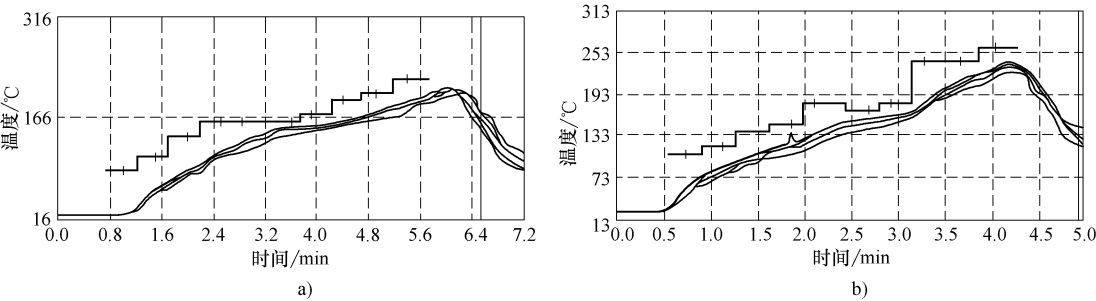


图 3-4-60 回流焊温度线性上升曲线
a) Sn-37Pb (峰值温度 220℃) b) Sn-3.9Ag-0.6Cu (峰值温度 249℃)

参 考 文 献

[1] Huang B, Lee N C. Prospect of Lead Free Alternatives for Reflow Soldering [C]. IMAPS, Chicago: 1999, 111-116.

[2] Frear D, Bradley E. Development of Lead and Halogen Free Peripheral Leaded and PBGA Components to Meet MSL260C Peak Reflow [C]. Electronics Goes Green. Berlin: Fraunhofer Institute, 2000, 9.

[3] Siewert T, Liu S, Smith D R. Properties of Lead-Free Solders, Release 4. 0 [R]. Colorado: NIST, 2002, 2.

[4] Kanchanomai C, Miyashita Y, Mutoh Y. Low cycle fatigue and fatigue crack growth behaviour of Sn – Ag eutectic solder [J]. Soldering and Surface Mount Technology, 2002, 14 (3): 30-36.

[5] Hunt C, Lea D. Solderability of Lead-free Alloys [C]. Proceedings of Apex 2000, CA, Long Beach: 2000, 3.

[6] Sattiraju S V, Dang B, Johnson R W. Wetting Characteristics of Pb-free Solder Pastes and Pb-free PWB Fini-

- shes [C]. IEEE, 2001 Electronic Components and Technology Conference.
- [7] Glazer J. Metallurgy of Low Temperature Pb-Free Solders for Electronic Assembly [J]. International Materials Reviews, 1995, 40 (2): 65-93.
- [8] Loomans M E, Vaynman S, Ghosh G, et al. Inverstigation of Multi-Component Lead-free Solders [J]. Journal of Electronic Materials, 1994, 23 (8): 741.
- [9] Moon K W, Boettinger W J. Accurately Determining Eutectic Compositions [J]. The Sn-Ag-Cu Ternary Eutectic, JOM, 2004, 56 (4): 22-27.
- [10] Kim K S, Huh S H, Sukanuma. Effects of cooling speed on microstructure and tensile properties of Sn-Ag-Cu alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 106-114.
- [11] Plumbridge W J. The analysis of creep data for solder alloys [J]. Soldering & Surface Mount Technology, 2003, 15 (1): 26-30.
- [12] Kariya Y, Otsuka M. Mechanical Fatigue Characteristics of Sn-3. 5Ag-X (X = Bi, Cu, Zn and In) Solder Alloys [J]. Journal of Electronic Materials, 1998, 27 (11): 1229-1235.
- [13] Baggio T. Turning a New Leaf in a Lead-free Market [C]. Proceedings of IPC Works'99, MN, Minneapolis: 1999, 10.
- [14] Sidhu R S, Deng X, Chawla N. Microstructure Characterization and Creep Behavior of Pb-Free Sn-Rich Solder Alloys; Part II. Creep Behavior of Bulk Solder and Solder/Copper Joints [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39A (2): 349-362.
- [15] Pang H L J, Xiong B S, Low T H. Low cycle fatigue study of lead free 99. 3Sn - 0. 7Cu solder alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26: 865 - 872.
- [16] Toyoda Y. The Latest Trends in Lead-Free Soldering [C]. Proceedings of International Symposium on Electronic Packaging Technology, Beijing: 2001, 434-438.
- [17] Snugovsky L, Snugovsky P, Perovic D D, et al. Phase equilibria in Sn rich corner of Cu-Ni-Sn system [J]. Materials Science and Technology, 2006, 22 (8): 899-902.
- [18] Vuorinen V, Yu H, Laurila T, et al. Formation of Intermetallic Compounds Between Liquid Sn and Various Cu-Nix Metallizations [J]. Journal of Electronic Materials, 2008, 37 (6): 792-805.
- [19] Nogita K, Nishimura T. Nickel-stabilized hexagonal (Cu, Ni)₆Sn₅ in Sn - Cu - Ni lead-free solder alloys [J]. Scripta Materialia, 2008, 59: 191-194.
- [20] Tsukamoto H, Dong Z G, Huang H, et al. Nanoindentation characterization of intermetallic compounds formed between Sn - Cu (- Ni) ball grid arrays and Cu substrates [J]. Materials Science and Engineering B, 2009, 164: 44-50.
- [21] Rizvi M J, Bailey C, Chan Y C, et al. Effect of adding 0. 3 wt% Ni into the Sn - 0. 7 wt% Cu solder; Part I: Wetting behavior on Cu and Ni substrates [J]. Journal of Alloys Compounds, 2006, 438 (1-2): 116-121.
- [22] Nogita N, Gourlay C M, Nishimura T. Cracking and Phase Stability in Reaction Layers between Sn-Cu-Ni Solders and Cu Substrates [J]. JOM, 2009, 61 (6): 45-52.
- [23] Nishikawa H, Piao J Y, Takemoto T. Interfacial Reaction between Sn-0. 7Cu (-Ni) Solder and Cu Substrate [J]. Journal of Electronic Materials, 2006, 35 (5): 1128-1133.
- [24] Roggeman B. Reliability Inverstigation of Sn/Cu/Ni Solder Joints [C]. 2009 SMTA International Conference Proceedings, 1-6.
- [25] Zhou J, Sun Y S, Xue F. Properties of low melting point Sn - Zn - Bi solders. Journal of Alloys and Compounds [J], 2005, 397 (1-2): 260-264.
- [26] Loomans M E, Vaynman S, Ghosh G, et al. Investigation of Multi-component Lead-Free Solders [J]. Journal of Electronic Materials, 1994, 23 (8): 741-746.
- [27] Shohji I, Yoshida T. Comparison of low-melting lead-free solders in tensile properties with Sn-Pb eutectic solder [J]. Journal of materials science: materials in electronics, 2004, 15: 219-223.

-
- [28] Shohji I, Gagg C, Plumbridge W J. Creep Properties of Sn-8Mass% Zn-3Mass% Bi Lead-Free Alloy [J]. Journal of Electronic Materials, 2004, 33 (8): 923-927.
- [29] Kim K S, Matsuura T, Suganuma K. Effects of Bi and Pb on Oxidation in Humidity for Low-Temperature Lead-Free Solder Systems [J]. Journal of Electronic materials, 2006, 35 (1): 41-47.
- [30] Prasad S, Carson F, Kim G S, et al. Board Level Reliability of Lead-Free Packages [C]. SMTA International, IL, Chicago: 2000, 24-28.

第 4 篇

▶▶ 高能束及其他焊接方法基础

高能束是一种高能密度束流，以激光束、电子束为典型代表。由于它能量密度高，加热集中，可控性强，深宽比大，变形小，适用于高熔点金属和热敏感金属以及化学活性强的金属焊接，越来越多地应用于热加工，特别适用于航空、航天、核电工业中精密及大厚度结构件的焊接。本篇就激光、电子束产生的原理、基本概念及其焊接、切割的设备、工艺特点和应用实例进行重点介绍，另外，在逐一阐述电渣焊、气焊与气割、热剂焊、胶接等基本概念、原理的基础上，介绍它们的工艺特点、所用材料、设备和应用。

第 1 章 激光焊接与切割

1960 年美国人梅曼 (Maiman) 制成了世界上第一台激光器 (红宝石激光器), 标志着激光 (LASER) 技术的诞生。由于激光独特的特点, 特别是自大功率和高功率以及高质量激光问世以来, 激光束在工业加工中的应用更为广泛。与电子束一样, 激光束是一种高能密度束流。它是由光子组成的, 对材料的加热机理、与材料的相互作用以及焊接和切割加工的工艺有着自身的特点。本章就激光产生的原理、激光与材料的相互作用、激光焊接设备、激光焊接和切割的方法与工艺等内容进行介绍, 包括基本概念、工艺特点和应用实例。

激光具有高亮度、高方向性、高单色性和高相干性四大特点, 当功率密度足够高时激光可使金属材料熔化, 凝固后形成焊缝。激光器易于控制, 可与计算机数控系统或机械手、机器人配合, 实现自动焊接。当采用 Nd: YAG 等波长为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右的固体激光时, 激光束可通过光纤传输, 使激光焊接系统的加工柔性大大增加。

1.1 激光的产生原理

美国科学家哥伦比亚大学的汤斯 (Townes) 和肖洛 (Schawlow) 在 1958 年 12 月的 *Physics Review* 杂志上联名发表了文章, 首次详细描述了开放式光波段量子振荡器, 从而标志着激光的发明。激光 (LASER) 是受激辐射的光放大, 它不同于普通光源的自发辐射。激光的产生是以受激辐射、谐振放大等为核心要素的。

1.1.1 原子能级结构

原子由原子核和电子组成, 带负电荷的电子在有限个可能的轨道上围绕原子核做旋转运动。电子的旋转运动和电子与原子核间的相互吸引构成了电子的内能。波尔假说指出, 原子存在着某些定态, 在这些定态中原子不发射也不吸收电磁辐射, 原子定态的能量只能取分立值, 即 E_1 、 $E_2 \dots$ 。这些具有分立值的定态称为能级。原子能级中能量最低的能级称为基态, 其他比基态能量高的能级都称为激发态。当原子从一个能级跃迁到另外一个能级时会吸收或发出能量辐射。在热平衡情况下, 任意两个高低能级上的原子数或粒子数的分布服从玻尔兹曼统计规律, 如式 (4-1-1) 所示。

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{\frac{(E_2 - E_1)}{kT}} \quad (4-1-1)$$

式中 n_1 、 n_2 ——分别为低能级 E_1 和高能级 E_2 上的原子数;

E_1 、 E_2 ——分别对应能级的能量值;

k ——玻耳兹曼常数;

T ——原子体系的热平衡温度。

由于 $E_2 > E_1$, 所以 $n_2 < n_1$ 。也就是说, 在热平衡状态下, 高能级上的原子数总是小于低能级上的原子数。

1.1.2 原子的辐射跃迁与吸收跃迁

根据爱因斯坦的量子理论, 在辐射场与原子的相互作用过程中存在着原子的辐射跃迁和原子的吸收跃迁, 而原子辐射跃迁又可分为原子自发辐射跃迁和受激辐射跃迁。

原子的自发辐射跃迁是在没有任何外来光子的作用下,处于高能级 E_2 的原子自发地跃迁到低能级 E_1 上,并辐射出一个能量为 $h\nu = E_2 - E_1$ 而相位、方向和偏振态为随机的光子。自发辐射跃迁是个只与原子本身性质有关而与辐射场无关的自发过程。自发辐射跃迁的几率是原子在高能级上的平均寿命的倒数。

原子的受激辐射跃迁则是在受到能量为 $h\nu$ 的外来光子诱发下,处于高能级 E_2 的原子跃迁到低能级 E_1 上,并辐射出一个同能量同相位同方向同偏振态的光子。受激辐射跃迁的几率则不仅跟原子本身性质有关,还与辐射场的单色能量密度有关。受激辐射与自发辐射最大的区别就是相干性。自发辐射的相位是不相干的,方向和偏振态是无规则分布。受激辐射则显然是相干光。

当原子在外界激励作用下,处于低能级 E_1 上的原子吸收一个能量为 $h\nu$ 的光子,跃迁到高能级 E_2 上,这个过程则称为原子的(受激)吸收跃迁。

1.1.3 激励与粒子数反转

要使原子产生受激辐射跃迁而辐射出光子,首先需使原子处于高能级上。通过外界能量的施加,使原子的能级提高,这个过程称为激励,激励过程也称为泵浦。外界激励的方式有光激励、放电激励、化学能激励、热能激励和核能激励等。对于气体激光,其常用的激励方式是气体放电激励;对固体激光的常用激励方式为光激励,如脉冲氙灯、连续氪灯或半导体激光的泵浦等。

当光通过某介质时,介质中的受激辐射和受激吸收是同时存在的。只有当受激辐射的光子数多于受激吸收的光子数,介质才能对外表现出光的放大作用,才能成为激光工作介质。一般在热平衡状态下,低能级上的粒子数总是大于高能级上的粒子数,介质对通过的光总是表现为光的吸收。只有当高能级的粒子数大于低能级上的粒子数,即实现粒子数反转,则介质才具有光增益作用。

要实现粒子数的反转,首先介质本身的能级结构中应存在着亚稳态能级。处于高能级上的原子是不稳定的,通常原子在低能级上的平均停留时间(即平均寿命)很短,是 10^{-8} s 数量级。但有的能级寿命比较长,可达毫秒数量级,这些能级称为亚稳态。亚稳态的存在有利于高能级上粒子的堆积,即利于实现高能级上粒子数大于低能级上的粒子数。其次,必须有外界的激励,使介质吸收相应的能量来实现粒子从低能级到高能级的跃迁。

能够产生粒子数反转分布的介质称为激活介质,也可称为激光器的工作介质。实现了粒子数反转后的激活介质对一定频率的光就具有放大作用,此时的激活介质称为增益介质。

常见的激活介质的能级结构主要是三能级结构和四能级结构。比如,掺铬离子的红宝石晶体就是一个三能级系统,掺钕离子的 YAG 晶体则为一个四能级系统。相对而言,四能级系统比三能级系统更容易实现粒子数的反转。

1.1.4 光学谐振腔

激活介质实现了粒子数反转后就成为了增益介质,可以做成光放大器。但是由于激活介质内部来源于自发辐射的初始光信号是随机的,其诱发的受激辐射的方向也是随机的。另外,增益介质的增益系数和长度是有限的,光子单次通过增益介质获得的增益也是有限的、较弱的。因此,有必要在增益介质两侧设置一对平行的反射镜来使光子多次经过介质,进一步增加光增益。这对反射镜就构成了光学谐振腔。在光学谐振腔内,只有平行于轴线传播的光才能被来回反射形成激光,而其他方向传播的光将逸出腔体。光学谐振腔起到了提供正反馈、选择光波的方向和频率的作用。

两个平行的平面反射镜构成了最简单的光学谐振腔,称为平行平面腔,多用于固体激光器。如按照反射镜表面形状,谐振腔还有双凹腔和平凹腔形式。无论是何种形式的谐振腔,两个反射镜中,一个是全反射的,另一个是部分透射的。

激光器要获得稳定的输出，谐振腔必须达到稳定条件，从而使光线在腔内任意多次往返后而不横向逸出腔外。谐振腔的稳定条件就是谐振腔的长度和两端反射镜表面的曲率半径之间满足一定的条件。

谐振腔稳定后，其内可能存在的频率和方向称为本征模，即能够在腔内存在的稳定的光波基本形式。按频率区分的称为纵模，按方向区分的称为横模。稳定的含义是：光波振幅在空间上的分布是确定的，不随时间而变化；光波相位在空间的分布是确定的，不随时间而变化；光波频率是确定的。对于焊接加工来说，激光的横模特征是重要的加工影响因素。横模是光场在垂直于腔轴方向的平面内光强度分布情况。横模模式一般用符号 TEM_{mn} 来表示，其中 TEM 表示横向电磁场， m 、 n 为正整数且表示横模的序数。在方形镜和圆形镜情况下几种简单横模的光强分布图形见表 4-1-1。其中 TEM_{00} 称为基模，是最简单的光斑结构，在光束横行截面上光强度集中在中心区域，且按高斯分布规律由中心向外逐步递减。

表 4-1-1 几种简单横模的光强分布图形

镜子形状	几种简单的横模图形			
方形镜	 TEM ₀₀	 TEM ₁₀	 TEM ₂₀	 TEM ₁₁
圆形镜	 TEM ₀₀	 TEM ₁₀	 TEM ₂₀	 TEM ₀₁

1.1.5 激光特性

激光除了具有普通光的反射、折射、干涉、衍射、偏振等性质外，还有普通光不具备的突出特性，即高的方向性、高的单色性、高的亮度和高的相干性四大特性。

激光是受激辐射，且经过谐振腔的限制性选择，激光光束中的各个光子的传播方向理论上是完全一致的，当然实际激光束总存在一定的发散，但其发散角很小，一般只有毫弧度数量级。很小的发散角，说明激光的方向性很好，因此可以传播到很远的地方。不同类型的激光器的光束方向性有很大的区别，这和激光工作物质的均匀性和种类、谐振腔、激励方式等有关。气体激光器的激光工作物质为气体，均匀性好，所以方向性最好。以氦氖激光为例，其发散角可小到 10^{-4} rad 数量级。而普通的光源发出的光是朝各个方向的，发散角可视为 4π rad。探照灯发出的光束的发散角也要在 10^{-1} rad 数量级。

单色性是指光的频率或波长的单纯程度。理想的单色光是不存在的，所以任何光的频率或波长总存在一定的范围，即有一定的谱线宽度。把某光谱线的光强度降到峰值一半所对应的频率宽度或波长宽度定义为该光谱线的谱线宽度。普通光源和太阳光的谱线宽度为几百纳米，光源氪灯发出的光的谱线宽度为 10^{-2} nm 数量级。而激光的单色性相当好，以单频的氦氖激光为例，其谱线宽度已达 10^{-7} nm 数量级。

光的亮度是表征一束光强弱程度的一个重要物理参量。光的亮度定义为单位面积单位立体角范围内通过的光功率，单位为 $W/(cm^2 \cdot sr)$ 。普通光方向性很差，发光面积大，所以光亮度很低；而激光方向性强，即发散角小，且发光面积小，所以激光的亮度非常高。已知太阳光的辐射亮度约为 $10^3 W/(cm^2 \cdot sr)$ ，而以一个输出功率为 100mW、发射面积为 $1mm^2$ 、发散角为 0.1mrad 的氦氖激光器为例，其激光亮度为 $10^5 W/(cm^2 \cdot sr)$ ，约为太阳光的 100 倍。

光的相干性是指光波场在空间不同位置上瞬时的或统计的相位相关性质。光波场的相干性分为

时间相干性和空间相干性。时间相干性是描述光束传播方向上各点的相位关系，它与光源谱线宽度（即单色性） $\Delta\nu$ 成反比。空间相干性是指空间两点在同一时刻的相干性，描述的是垂直于光束传播方向上各点之间的相位关系，与光的方向性（即发散角）有密切关系。由于激光的高单色性和高方向性，所以激光有很好的时间相干性和空间相干性。

1.1.6 激光束质量特征描述

在激光焊接、切割以及其他激光热加工时激光束质量是激光束选择考虑以及影响工艺参数设定的重要因素。这里的激光光束质量是对光束的空间分布特征的描述。光束质量特征可以由多种参数进行描述，如发散角、光束参数积、光束传播因子、横模模式等。

1. 发散角

激光发散角描述激光束在空间传输的发散程度。设激光束沿 z 轴传播，则激光发散角的定义如式（4-1-2）所示：

$$\varphi = \lim_{z \rightarrow \infty} \omega(z)/z \quad (4-1-2)$$

式中 $\omega(z)$ ——激光束束径（mm）。

对于波长为 λ 的基模高斯光束，如果其束腰光斑半径为 ω_0 ，则发散角半角如式（4-1-3）所示：

$$\theta = \lambda / (\pi \omega_0) \quad (4-1-3)$$

发散角越小，则光束的方向性越好。在激光打孔、激光切割、激光焊接、激光微细加工时要求激光光束的发散角尽可能小和聚焦性尽可能好。但是光束发散角可能会在光束的传播过程中发生变化，如光束经过凹（凸）透镜、光束投射到曲面反射镜等情况下。因此，发散角不是描述光束质量特征和进行比较的最佳参数。

2. 光束参数积

光束参数积可定义为光斑半径与该处的半发散角的乘积。对于直径为 $2\omega_0$ 圆形对称的光束，其远场发散角为 2θ ，该光束的光束参数积（BPP）如式（4-1-4）所示：

$$BPP = \omega_0 \theta \quad (4-1-4)$$

光束参数积不随光束传输变换而改变，因而能排除光学系统的影响，用它来表征光束质量，比单独用发散角等参数更加明确、客观。

3. 光束传播因子和光束衍射极限因子

描述光束质量的参数还有光束传播因子和光束衍射极限因子两个参数。这两个参数都是在光束参数积 BPP 基础上衍生出来的。光束传播因子（ K ）和光束衍射极限因子（ M^2 ）描述的都是理想光束（基模高斯光束）的光束参数积与实际光束的光束参数积之间的比值，且两者互为倒数。具体关系如下：

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{\lambda}{\pi(\omega_{i0}\theta_r)} \quad (4-1-5)$$

式中 $\omega_{i0}\theta_r$ ——实际光束的光束参数积（mm·mrad）。

对于基模高斯光束， $M^2 = 1$ ，达到衍射极限。 M^2 越大，光束发散越快。通常来说，激光光束的 K 值为 0.1 ~ 1 之间， M^2 值则为 1 ~ 10。

4. 横模模式

激光光束的横模模式情况如本篇 1.1.4 章节中所描述的。基模、低阶模的激光束横截面上的能量分布相对集中，具有更好的聚焦能力，因此，这类激光光束适合应用于激光切割、激光焊接等加工领域。而激光淬火进行金属表面热处理时，希望淬火区内热循环过程相近的区域越大越好，整个热处理区域的硬度、淬硬深度等最好接近一致，为此，选用光斑处能量分布更为均匀的高阶模激光则更为合适。

1.2 激光焊焊接设备

1.2.1 激光焊焊接设备的组成

激光焊焊接工艺的实现依靠激光焊接设备。激光焊焊接设备的组成可以基本划分为激光器、光路系统、电器控制系统、加工机和辅助系统五个部分,如图 4-1-1 所示。

激光器是激光焊焊接设备中的重要组成部分,提供焊接加工所需的激光热源。焊接用激光器输出的光束模式为基模或低阶模,激光器具有一定的输出功率或输出能量且精确可调,其输出应能保持长时间的稳定和可靠。

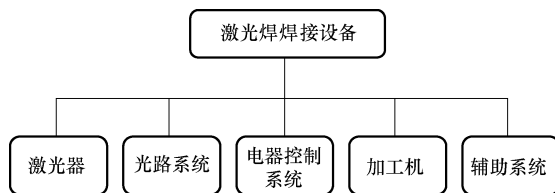


图 4-1-1 激光焊焊接设备的组成

光路系统实现对激光束的传输和聚焦,有些场合还需对激光束进行分光。焊接用激光的功率都为大功率或高功率范畴。它的传输必须在可靠、封闭的环境中进行,以免对人员造成伤害。

电器控制系统的内容包括激光器电源和设备整体的电器控制。激光器电源向激光振荡器提供激励能,控制激光产生与输出,并接受设备整体控制系统的控制。设备整体控制系统可以是计算机数字控制 (computer numerical control, CNC) 系统或机器人控制系统,实现对焊接运动和激光输出的控制,焊接参数的设置、焊接过程的程序控制、安全环节的监控,以及如焊缝跟踪的工艺过程实时控制。

加工机用于实现焊接时激光束与焊接工件的相对移动。其运动精度在很大程度上影响了激光焊接的精度,需采用精密机械和 CNC 数控。

辅助系统是激光焊接加工时还需要的其他辅助性装置,这里主要是指工艺介质输送系统,如送气系统、焊接材料 (丝状或粉状) 的输送系统。

实际上激光焊焊接设备一般还包括内外光路的冷却系统。因为焊接用激光器的电光转换效率低的只有 2%、高的也不超过 40%, 所以一般必须配有冷却系统,以便及时带走电光转换过程中产生的大量热量,保持激光器的稳定工作。在光束反射传输系统中的铜反射镜将吸收 1% 左右的激光功率,为避免铜镜受热引起镜面变形,也需冷却水及时将铜镜中的热量带走。

此外,为进行激光束的定位和准直,还需要小功率的 He-Ne 激光器。安装 He-Ne 激光器时,使红色的 He-Ne 激光与焊接用激光同轴,依此可进行光路调整和与工件对中。

以下将进一步介绍激光焊接设备中的激光器、光路系统和工艺介质输送系统。

1.2.2 激光器

激光器是激光焊焊接设备中的核心器件,它产生和输出用于焊接的激光束。在激光焊接中使用的激光器类型目前主要是 CO₂、YAG、光纤和半导体等激光器,其中前一个为气体激光器,后三个为固体激光器。

1. CO₂ 激光器

CO₂ 激光器以气体分子为激活介质,其激发产生输出的激光波长为 10.6μm。实际 CO₂ 激光器的激光工作气体为 CO₂ 分子与 N₂ 分子和 He 原子的混合气体,其中 N₂ 分子的加入是为了提高 CO₂ 的激发速率,He 原子有良好的导热性而使激活介质中的热量及时得到排除和增加粒子数的反转。气体分子在振荡器中分布均匀性好,故 CO₂ 激光器的光束质量好,易获得接近衍射极限的高斯光束。CO₂ 激光器的可输出激光功率范围大,转换效率较高 (一般达 10% ~ 15%), 激光单色性好,

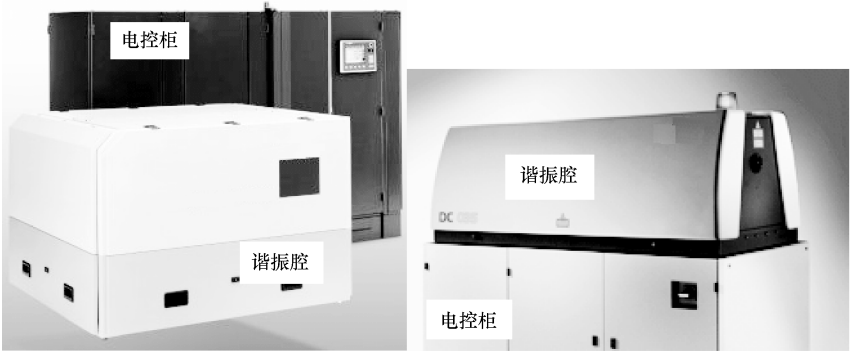
可连续输出和脉冲输出，运行成本低。通常将输出功率为 300W ~ 1kW 的称为大功率 CO₂ 激光器，输出功率 1kW 以上的称为高功率 CO₂ 激光器。

CO₂ 激光器按其工作原理可分为多种类型，目前主要的类型有三种：快速轴流型、横流型和扩散冷却型。快速轴流型的激光工作气体沿激光谐振腔的轴线快速流动。横流型的激光工作气体则垂直于谐振腔轴方向流动。扩散冷却型则采用大面积的板式放电电极和很小的板式电极间距，达到良好的冷却效果和极小的气体消耗。这三种类型 CO₂ 激光器的性能比较见表 4-1-2。

表 4-1-2 三种类型 CO₂ 激光器的性能比较

性能	快速轴流型	横流型	扩散冷却型
输出功率/kW	0.7 ~ 20	3 ~ 45	1 ~ 8
光束模式	TEM ₀₀ ~ TEM ₀₁	TEM ₀₂ 以上	TEM ₀₀ ~ TEM ₀₁
光束传播因子 K	0.2 ~ 0.6	>0.18	≥0.9
脉冲频率/kHz	10 ~ 100; 连续波	连续波	0 ~ 5; 连续波
气体消耗	大	小	极小
电光转换效率(%)	≤15	≤15	≤30

图 4-1-2a、b 所示分别为德国 Trumpf 公司生产的 15kW 快速轴流型 CO₂ 激光器、德国 Rofin 公司生产的 3.5kW 扩散冷却型 CO₂ 激光器的产品。



a) 图 4-1-2 CO₂ 激光器产品外形 b)

a) 15kW 快速轴流型 CO₂ 激光器 b) 3.5kW 扩散冷却型 CO₂ 激光器

2. Nd: YAG 固体激光器

Nd: YAG 激光器采用钕离子 (Nd³⁺) 作为激活介质并将其掺杂在钇铝石榴石 (Y₃Al₅O₁₂) 晶体中，以光泵浦为激励方式，输出激光的波长为 1.06μm。Nd: YAG 激光器可以工作在连续、脉冲和超短脉冲方式。与 CO₂ 激光相比，YAG 激光因波长短而可通过光纤传输，使导光简单，易实现加工柔性化和多工位加工。被焊接材料对 1.06μm 波长的激光的吸收率较高，在同样的焊接深度和焊接速度情况下，YAG 激光需要的激光功率明显低于 CO₂ 激光。一般数百瓦的 YAG 激光就可进行焊接加工。另外，YAG 激光器结构相对紧凑，占地面积较小。

常规的 Nd: YAG 激光器采用棒状工作晶体和灯泵浦方式，其电光转换效率只有 3% 左右。近年来开发的激光器采用了二极管激光泵浦技术，使 Nd: YAG 激光器的电光转换效率大为提高，达到了 10% 或以上^[3,7]。由于晶体棒的散热能力和不可避免的缺陷，激光器的激光功率输出和光束质量受到了限制。目前市场上棒状晶体的 YAG 激光器的最大激光输出功率可达 4.4kW，典型光束质量（光束参数积，BPP）为 12mm · mrad 或 25mm · mrad。

德国 Trumpf 公司生产的 3.3kW 灯泵浦 Nd: YAG 激光器产品外形如图 4-1-3 所示。

3. 盘片式 YAG 激光器

盘片式 YAG 激光器是另外一种新近开发的采用 YAG 晶体的固体激光器。盘片式 YAG 激光器

克服了棒状 YAG 晶体因散热不佳导致的热透镜问题,使输出功率、光束质量和转换效率得到了显著提高。盘片式 YAG 激光器采用了掺杂镱(Yb)离子的 YAG 晶片为工作物质,晶片的厚度只有不到 1mm,输出的激光波长为 1030nm。它以二极管激光为泵浦源并通过抛物面反射镜多次从单侧面辐射激励晶片,而晶片的另外一面则与一冷却块表面接触以获得优良的冷却效果。其总体电光转换效率现可达 20% 以上,光束质量(BPP)为 $2 \sim 12 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,目前德国 Trumpf 公司生产的盘片式激光器最大连续波激光输出功率已达 16kW。德国 Trumpf 公司生产的 4kW 盘片式 YAG 激光器产品外形如图 4-1-4 所示。

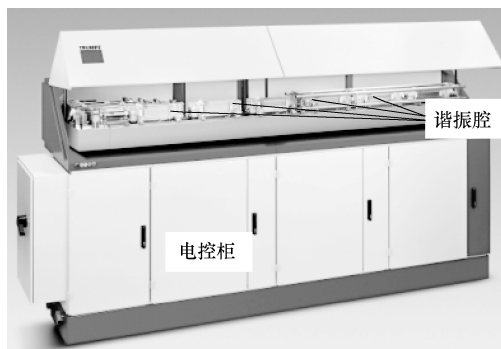


图 4-1-3 3.3kW 灯泵浦 Nd:YAG 激光器产品外形



图 4-1-4 德国 Trumpf 公司 4kW 盘片式 YAG 激光器产品外形

4. 光纤激光器

以光纤为工作介质的光纤激光器具有光束质量好而稳定、低泵浦下容易实现连续运转、可制成全光纤系统、转换效率高、结构简单、体积小、长时间免维护等众多优点,是激光技术发展史上的革命性产品,在光纤通信、军事、激光加工、激光医疗等领域得到了广泛应用。目前成熟应用的光纤激光类型是稀土掺杂光纤激光器。随着高功率光纤激光技术的突破,光纤激光器在激光焊中得到了越来越多的应用,正在许多场合中将逐渐替代传统的 CO_2 激光器和 Nd:YAG 激光器。

用于焊接的高功率光纤激光器采用掺镱(Yb^{3+})双包层光纤,光纤由纤芯、内包层、外包层和保护层 4 层组成。纤芯即为掺稀土元素镱的 SiO_2 纤维,构成激光振荡的通道;纤芯外侧的内包层为折射率较小的纯 SiO_2 制成,是泵浦光的通道;再往外为第三层的外包层,由折射率更小的软塑料构成;最外层则为用硬塑料制成的保护层。在光纤两端固定安装反射镜构成谐振腔,泵浦源则可采用二极管激光或其他固体激光。

光纤激光器可分为单模和多模(为低阶模),可以脉冲方式和连续方式输出,激光波长在 $1.07 \mu\text{m}$ 左右。单模连续光纤激光器的最大输出功率已达 1.5kW,电光转换效率 25%,光束模式为基模,光束质量(光束传播因子 K)为 > 0.9 ,近似高斯光束。多模连续光纤激光器的最大输出功率可达 50kW,电光转换效率达 30%,光束质量(BPP)为 $2 \sim 12 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。图 4-1-5 所示为美国 IPG 公司生产的最大输出激光功率为 3kW 的光纤激光器外



图 4-1-5 3kW 的光纤激光器外形

形, 激光器的几何尺寸为 $86\text{cm} \times 120\text{cm} \times 81\text{cm}$ 。

5. 半导体激光器

半导体激光器早已在通信、计算机和电子行业中得到广泛应用。近年来随着高功率半导体激光器的开发成功, 它正被逐渐应用到材料加工中。半导体激光具有尺寸很小、电光转换效率高(30%~40%)、发散角大、非相干光束等特点。

半导体激光器的工作原理是, 以砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)等半导体材料为工作物质, 采用电流注入方式进行泵浦, 利用半导体晶体中的自然解理面作为反射镜而构成谐振腔。半导体激光器的工作物质半导体材料具有能带结构, 其激光的产生是基于在电流激励下半导体材料内导带中的电子和价带中的空穴的复合, 即复合辐射。半导体激光的波长分为 808nm、940nm 和 980nm。一个单管半导体激光二极管(大小为 $500\mu\text{m} \times 115\mu\text{m} \times 1 \sim 2\text{mm}$) 的激光输出功率已超过瓦级; 将若干个激光二极管单元并排组成一个激光条, 激光输出功率已可达 10~100W; 将一定数量的钎焊在铜冷却块上的激光条堆叠起来就构成了一个“堆栈”, 通过空间填充、偏振耦合和波长耦合等方法将数个“堆栈”输出的光束组合起来, 最后可实现数千瓦的激光功率输出。目前市场上作为标准产品提供高功率半导体激光的主要有德国 Rofin 公司和 Laserline 公司, 其中, 德国 Laserline 公司的半导体激光最大激光输出功率目前达 10kW。图4-1-6 所示为德国 Rofin 公司的 2.8kW 半导体激光头(555mm×260mm×225mm, 含激光二极管“堆栈”)。



图 4-1-6 功率为 2.8kW 半导体激光头外形

1.2.3 光束传输与聚集系统

光路系统主要由各种光学元件组成。光学元件分为透射型和反射型两类。YAG 激光和 CO_2 激光都用相应的透射材料制作成透镜。对于 CO_2 激光, 还需要反射型光学元件来反射传递光束。光路系统包括光束传输系统和光束聚焦系统两部分。

1. 光束传输系统

光束传输系统实际包括光束的扩束、分光和主动光强变化的传输。其中光束的扩束和分光是人为主动改变光束的直径、光强及光强分布。

(1) 光束扩束 光束的扩束是为了调节激光器输出的原始激光束的发散角, 利于光束的传输, 或使光束直径调整到聚焦系统所需的尺寸。如 CO_2 激光在变光程的反射传输过程中, 因光束发散角的存在, 光束直径将随着传输距离变化而变化, 为减少光程变化范围内光束直径的变化起伏, 可将光束扩大, 因发散角和光束直径成反比, 发散角由此得到压缩。

光束扩束系统采用的是倒装望远系统, 待扩束的光束从目镜射入, 然后经物镜射出。如果物镜和目镜的焦距分别为 F_W 和 F_M , 输入光束的直径和发散角分别为 R_0 和 θ_0 , 则输出后的光束直径 R 和发散角 θ 分别为

$$R = \frac{F_W}{F_M} R_0 \quad (4-1-6)$$

$$\theta = \frac{R_0}{R} \theta_0 \quad (4-1-7)$$

望远系统有两种, 即伽利略望远系统和开普勒望远系统, 如图 4-1-7 所示。由于开普勒望远系统的物镜和目镜均为正焦透镜, 在光路中要汇聚激光, 会带来不利影响, 另外它的镜筒长、尺寸

大，所以激光系统中一般采用伽利略望远系统。

(2) 光束分光 有些激光焊加工需要几个工位同时使用一个激光源，为此可将光束进行分光，从而分配给不同工位。通过一个分光元件，一束光就可被分成两束光。分光元件可以是部分透射镜；也可采用光束转向镜，将激光束的一部分经反射转向至另一个工位。

(3) 光纤传输 对于波长在 $1\mu\text{m}$ 左右的 YAG 激光、光纤激光和半导体激光除了可用反射镜来传输外，通常此类激光焊接设备更多地采用光纤进行传输。光纤传输具有结构简单、体积小、柔性佳，可以长距离传输而不使光束发散，可使光束达到一般不容易到达的加工区域，光束截面上功率分布均匀性得到改善，容易实现多工位焊接，易于和机器人配合。

光纤传输原理就是利用光的全反射原理来传导激光。光纤传输系统由耦合端、光纤和输出端组成。在耦合端，由聚焦透镜将激光束聚焦到足够小（小于光纤纤芯直径），照射到纤芯上而进入光纤；在光纤另外一端则是输出端，在输出端从光纤传出的激光束经过透镜校准和聚焦，汇聚到工件表面上而进行焊接加工。光纤传输的结构原理如图 4-1-8 所示。

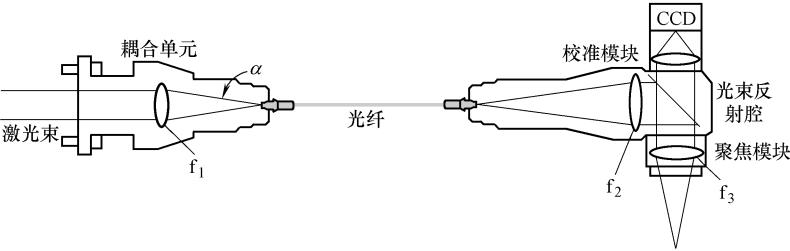


图 4-1-8 光纤传输的结构原理图

(4) 镜面反射传输和焦点位置补偿 对于 CO_2 激光的传输需采用镜面反射的方法。反射镜材料最常用的是铜，金、银等高反射材料也可使用；在低激光功率时反射镜也可采用硅或锗为基体加表面镀膜来制成。反射镜必须有很高的反射率和表面光洁度。为进一步提高反射率（98% 以上），则反射镜表面还需有光学镀膜。为将激光传输到加工位，一般需要多个反射镜来折射激光束。

当激光束与工件的相对运动靠激光工作头的移动来实现时，部分反射镜等光学元件将跟随运动轴而一起移动，此时其也称为飞行光学系统。在普通的飞行光学系统中光程是随时变化的，由于激光束或多或少地存在着一定的发散角，因此激光束投射到聚焦镜上的光束直径是不固定的，导致焦距后的焦点位置随光程的变化而变化。为了使焦点位置恒定，应使光束的实际传输距离保持不变。常用多关节式导光臂的结构如图 4-1-9 所示。图 4-1-9a 为普通的多关节式导光臂，光程

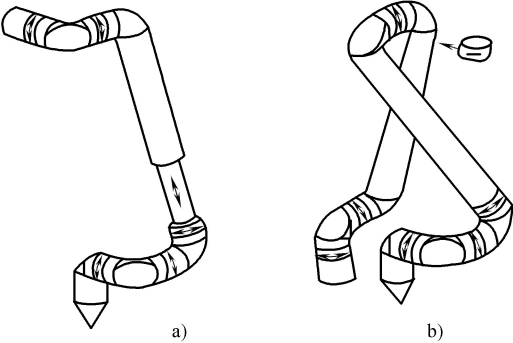


图 4-1-9 关节式导光臂外形结构

a) 普通多关节式导光臂 b) 等光程法多关节式导光臂

随激光头的移动而改变；图 4-1-9b 为改进的结构，即采用了等光程法，在导光臂的运动过程中光程基本保持不变。另外还可采用自适应变形反射镜组技术，即通过相应地改变变形反射镜反射面的曲率半径，来弥补光程变化引起的光束直径变化，系统结构如图 4-1-10 所示。其系统中的计算机监控系统将实时监测激光加工头的位置，然后计算出压力调节量并通过压力控制系统改变变形镜 1 和变形镜 2 的曲率半径。

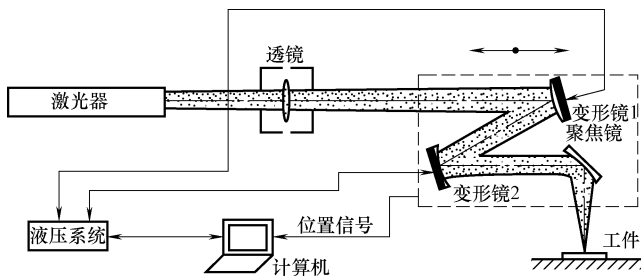


图 4-1-10 自适应变形反射镜技术系统结构

2. 光束聚焦系统

聚焦系统是光路系统另一重要部分，可由一个或多个镜子组成。通过对光束的聚焦才能实现对材料的激光焊接加工。根据所用光学元件类型，可分为透镜聚焦系统和反射聚焦系统。

(1) 透镜聚焦 透镜聚焦就是利用几何光学中的凸透镜实现激光束的聚焦。对于 CO_2 激光可采用硒化锌 (ZnSe)、砷化镓 (GaAs) 等材料制成透镜，YAG 激光器多采用硅酸硼冕牌玻璃作为透镜材料。无论是 CO_2 激光器还是 YAG 激光器，它们的透镜表面还必须镀介质膜或金属膜，才能达到所需的透射特性。透镜聚焦系统的价格比较便宜。焊接过程中不可避免的飞溅和烟雾很容易污染透镜，需采取保护措施，如在激光工作头中聚焦镜附近加入横向高压气流来阻挡飞溅和烟雾。YAG 激光器为保护透镜则往往采用玻璃作为防护。在透镜聚焦工作过程中，如果激光功率较高且又没有一定的冷却措施，透镜内部会因激光能量吸收而升温，产生“热透镜”效应，从而影响聚焦和加工质量。

(2) 反射聚焦 在激光焊接加工系统中，反射聚焦系统也得到了大量应用，尤其是高功率激光焊接场合时。反射镜通常采用高导热材料制成，背面可与水冷元件结合，其镜面热畸变小。反射聚焦镜可以是球面反射镜，也可以是抛物反射镜。抛物反射镜的聚焦不存在像差，聚焦质量高于球面反射镜，经常用于大功率和高功率激光焊接。反射镜的抛物面一般需用金刚石刀具进行切削加工来获得高的镜面反射，并配合不同的镀层。在高功率 CO_2 激光焊场合，为同时增加聚焦镜的抗磨损和抗飞溅能力，铜制反射聚焦镜表面往往会镀上一层钼 (Mo)。与透镜聚焦系统相比，反射聚焦系统较昂贵。

1.2.4 工艺介质传输系统

在激光焊过程中，焊接熔池区需要有气体保护，或加入粉状、丝状焊接材料，以实现良好焊接。这样，激光焊接设备中需配置输送气体、粉状材料或焊丝材料等工艺介质的输送系统，它由四个部分组成：材料存储和供给、输送装置、固定和位置调整机构及控制系统。

1. 气体输送系统

气体输送系统是激光焊中普遍应用的一种辅助系统。气体输送的作用是保护激光焊接工作头中的聚焦镜和保护熔池以及吹除等离子体。气体输送系统包括存储气体的高压气瓶或储气罐、气瓶口减压阀和气管构成的输送部分（输送的动力源为压差）、控制电磁阀工作和流量调节的控制器以及气路部件（包括气瓶、阀和气管）的固定。

2. 粉状材料输送系统

在激光焊、激光堆焊时会采用粉状的填充或堆覆材料，其对应的粉状材料输送系统就是用于将粉状材料按设定的流量送入到焊接熔池中。粉状材料输送系统包括粉末存储容器、输送机、输送控制回落和系统部件的固定机构。盘式送粉机和轮式送粉机的原理如图 4-1-11 所示。盘式送粉机的

粉末流量和速度由小闸门开启程度、圆盘转速和辅助送粉气的流量共同决定。轮式送粉机送粉量则取决于送粉轮转速。粉的送入与激光束可以是同轴也可以是旁轴。

3. 焊丝材料输送系统

焊丝材料输送系统在激光焊、激光钎焊或激光堆焊中将丝状材料送入熔池区域。丝材输送系统组成包括焊丝盘、送丝机、导丝管或导电嘴、固定装置、控制电路等。送丝机一般还包括送丝电动机、送丝轮、矫直轮和送丝软管等。在激光与熔化极气保护（MSG）电弧复合焊时，焊丝材料输送系统和熔化极气保护焊电源结合成一体。激光填丝焊送丝系统的结构如图 4-1-12 所示。

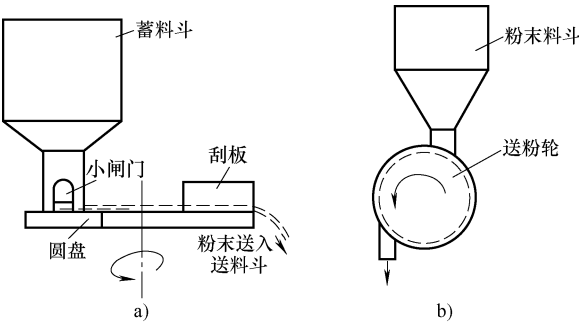


图 4-1-11 送粉机的原理示意图
a) 盘式送粉机 b) 轮式送粉机

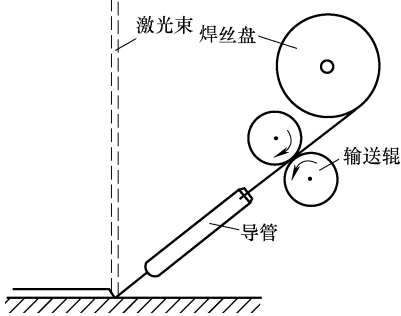


图 4-1-12 激光填丝焊送丝系统的结构

工艺介质输送系统的最后输出端与光束聚焦系统固定在一起，并构成了激光工作头。纯激光焊工作头和激光 - MSG 电弧复合焊工作头的结构分别如图 4-1-13a、b 所示。

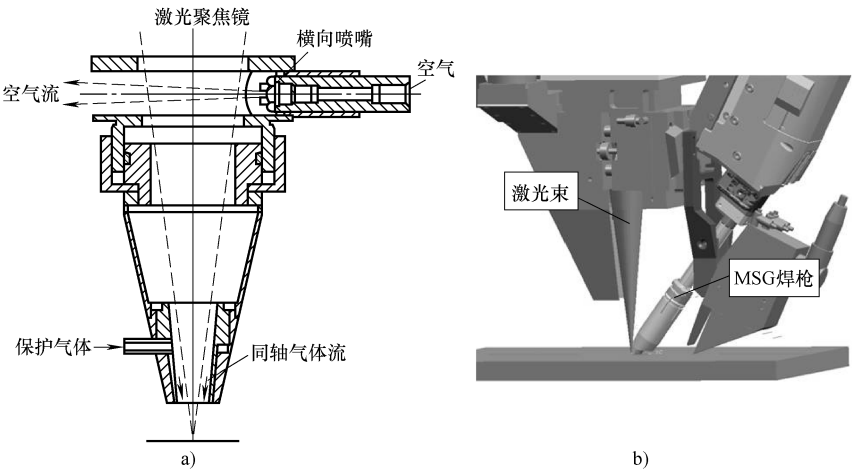


图 4-1-13 激光焊工作头的结构示意图
a) 纯激光焊工作头 b) 激光-MSG 电弧复合焊工作头

1.3 激光焊时激光与材料的相互作用

激光进行焊接和切割时激光束辐照在工件上，通过与工件材料的相互作用，使工件受热、熔化甚至进而蒸发，金属蒸气可在激光束的进一步辐照下产生电离。激光在与工件材料这样的相互作用下实现对工件的焊接或切割。根据激光束的辐照强度，激光与材料的相互作用过程可以分为无热光学作用、固体加热、表面熔化、气化与光致等离子体四个过程，如图 4-1-14 所示。

在激光能量密度很低时,与普通光相同,激光束辐射到材料表面时将被材料反射、透射和吸收。但由于能量密度低,吸收形成的热量很低,材料未发生明显的温度变化。当激光束功率密度在 10^3 W/cm^2 数量级时,材料表面将通过大量光子的碰撞而吸收足够多的能量,晶格产生强烈振动,材料由此得到有效加热,材料温度上升,通过热传导方式材料的受热区域进一步扩大。当激光功率密度达到 10^4

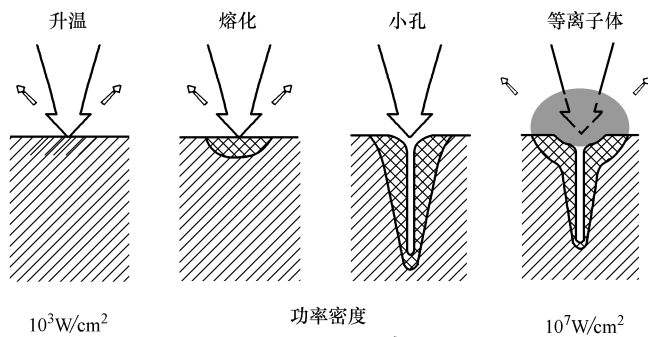


图 4-1-14 激光与材料的相互作用过程

$\sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时,材料受热温度升高

达到了其熔点,辐照区域材料表面熔化,形成熔池。当激光功率密度增加到 10^6 W/cm^2 数量级时,熔化的材料被加热到汽化点后,继续升温并形成蒸气,蒸气进一步吸收激光能量而导致电离。在蒸发反作用力下,熔池表面下凹,激光束在凹陷处的吸收大大增加,由此材料蒸发也进一步增强,熔池表面继续下凹,最后达到平衡后,在熔池形成了一个稳定的一定深度的“匙孔”。当激光功率密度达到 10^7 W/cm^2 数量级或以上时,光致等离子体将逆着激光束的入射方向传输,形成等离子体云团,出现等离子体对激光的屏蔽现象。

1.3.1 金属材料对激光的吸收

激光进行焊接等热加工时首先是激光能量要被材料所吸收,从而转换成热量。材料对激光的吸收能力可用吸收率来表征。吸收率不仅和材料性质有关,也受其他因素的影响。

1. 吸收率

激光能对材料进行加工,材料对激光的吸收是首先涉及的物理过程。激光入射到材料表面时,一部分被材料表面反射,一部分被材料吸收,另一部分通过材料透射。这一激光传播过程应满足能量守恒定律,用 E_0 表示入射到材料表面的激光能, E_R 表示被材料表面反射的激光能量, E_A 表示被材料表面吸收的激光能,而 E_T 表示透过材料的激光能,则由能量守恒定律有

$$E_0 = E_R + E_A + E_T \quad (4-1-8)$$

$$1 = \frac{E_R}{E_0} + \frac{E_A}{E_0} + \frac{E_T}{E_0} = R + \alpha + T \quad (4-1-9)$$

式中 R ——反射率;

α ——吸收率;

T ——透射率。

对于不透明材料,透射光也被吸收,即 $E_T = 0$,则有

$$1 = R + \alpha \quad (4-1-10)$$

激光在材料内部传播过程中,激光强度衰减。试验证明,对于各向同性的均匀物质来说,强度为 I 的入射激光通过厚度为 dx 的薄层后,其激光强度的相对减少量 dI/I 与吸收层厚度 dx 成正比。如激光入射至距表面 x 处的光强度 I ,则有 $dI/I \propto dx$,即

$$\frac{dI}{I} = \alpha dx \quad (4-1-11)$$

式中的正比系数 α 即为吸收率或称吸收系数。

设入射到材料表面的激光强度为 I_0 ,将式(4-1-11)从 0 到 x 积分,即求得激光入射到距表面

为 x 处的激光强度 I :

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (4-1-12)$$

式 (4-1-12) 称为布格定律。从布格定律可以看出, 随激光入射到材料内部深度的增加, 激光强度将以几何级数减弱。此外, 激光通过材料的 $1/\alpha$ 厚度后, 其光强将减少为 $1/e$ 。这说明材料吸收激光的能力应归结为其吸收系数 α 的数值, α 的常用单位是 $1/\text{cm}$ 。

材料对激光的吸收系数 α 与光强没有关系, 而与材料种类、激光波长等有关。例如, 常用作激光器输出镜或激光外光路中的透镜的 GaAs, 它对可见光是不透明的, 但对 CO_2 激光和 YAG 激光等红外光则是透明的。这种材料激光吸收系数 α 与波长有关的吸收称做选择吸收。相反, 材料激光吸收系数 α 不随波长而变的吸收则成为一般吸收。通常, 用 $1/\alpha$ 来大致反映不同材料对激光的平均透入深度。

2. 金属表面对激光的反射与吸收

激光焊接和切割的加工对象绝大部分是金属。金属是一组规则排列的原子, 其间存在未束缚的自由电子。激光在金属材料表面上的反射、吸收和透射是光波电磁场与金属中的自由电子或束缚电子相互作用的结果。当激光辐照在洁净的金属表面时, 金属中的自由电子将在光波电磁场作用下发生振动并产生次波, 这些次波构成了强烈的反射波和较弱的透射波。在金属中传导电子与热扰动的晶格发生碰撞, 将入射的激光能量不可逆地转化成焦耳热。从激光辐照到金属表面, 与金属内带电粒子相互作用, 使电子能量提高, 到能量在各质点间的均匀分布, 这个能量弛豫过程是非常短的, 典型值为 10^{-13}s , 可以认为是瞬间完成的。因金属中自由电子数密度大, 当透射部分激光在金属中传播时会被强烈地吸收。试验测试结果表明, 从波长为 $0.2\mu\text{m}$ 的紫外光到 $10\mu\text{m}$ 的红外光, 光在金属中的穿透深度为 $1 \sim 10\text{nm}$ 数量级。室温下激光垂直入射时不同金属的吸收率与激光波长的关系如图 4-1-15 所示。

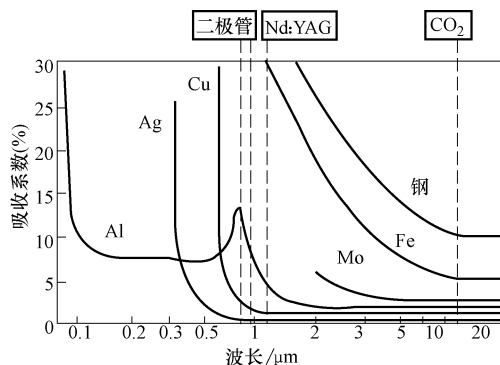


图 4-1-15 室温下激光垂直入射时不同金属的吸收率与激光波长的关系

由上述可以看出, 金属对 (激) 光的作用表现为强反射和强吸收。激光照射到金属材料表面时大部分的能量被反射, 而其余的小部分激光能量则在金属表面很小的浅层内被转化成焦耳热而被强烈吸收。

3. 影响激光吸收的因素

材料对激光的吸收主要受到材料的种类、激光波长、材料表面状态 (温度、表面粗糙度、氧化程度)、激光入射角、激光的偏振状态等因素的影响。

(1) 金属材料性质 如图 4-1-15 所示, 不同金属对光的吸收率是不同的。以波长为 $10.6\mu\text{m}$ 的 CO_2 激光为例, 钢对它的吸收率约为 10%, 纯铁 (Fe) 的吸收率约为 5%, 钼 (Mo)、铝 (Al)、铜 (Cu)、银 (Ag) 等对 CO_2 激光的吸收率依次减小, 其中铝、铜、银等对 CO_2 激光的吸收率都在 2% 以下。从吸收率的数值可以看出, 金属的表面会将一束激光的大部分能量反射掉。金属对光的吸收能力与金属内的自由电子密度密切相关。一般情况下, 金属内自由电子密度越大, 即电导率越大, 则其对光的吸收率越低。

(2) 激光波长 如图 4-1-15 所示, 激光波长是另一个影响到激光吸收的重要因素。一般来说, 随着光的波长降低, 金属对光波的吸收率增加。如当光波波长从 $10.6\mu\text{m}$ 降到 Nd:YAG 激光的 $1.06\mu\text{m}$ 时, 纯铁的激光吸收率提高到原来的 6 倍, 铝的激光吸收率也上升到约 5%。这是因为波长较长的光束的光子能量较低, 主要对金属内的自由电子发生作用, 金属的反射率较高; 波长较短

的光束的光子能量较大,可以对金属中的束缚电子产生作用,金属的反射率因而较低。

(3) 材料表面状态 材料的表面状态是另一个影响激光吸收的重要方面。金属表面的温度会影响其表面吸收激光的能力,图 4-1-16 所示为某金属材料对 CO_2 激光的吸收率随温度而变化的曲线。可见,在金属到达熔点温度之前,激光吸收率随温度而缓慢增加;当达到熔点时,金属对 CO_2 激光的吸收率快速上升,熔化状态下激光吸收率平均约为 45%;当达到汽化温度时,吸收率可达 90%。

金属表面如果存在氧化膜、污染或涂层,可使激光吸收率增加。此外,金属表面的粗糙度增加也将提升对激光的吸收率,而过于光滑的表面则会降低激光吸收率。

(4) 激光入射角和偏振状态 通过理论计算可知,激光入射到物体表面的吸收率与其入射角以及偏振状态有关。当激光的偏振面平行于入射平面,则激光吸收率随着入射角的增大而增大,在达到某个特定角度时吸收率达到最大值,随后吸收率随着入射角的进一步增加而减小。对于偏振面垂直于激光入射面的,激光吸收率则随着入射角的增加而减小。

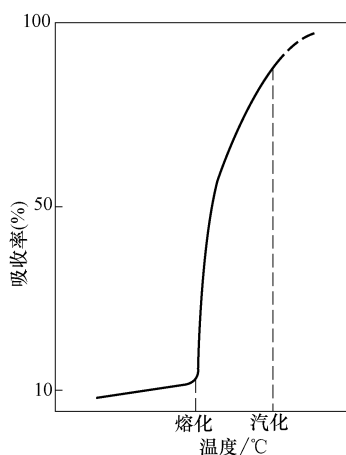


图 4-1-16 某金属对 CO_2 激光的吸收率随温度而变化的曲线

1.3.2 汽化和光致等离子体

当继续加热到材料表面温度达到汽化温度时,表面将发生汽化现象。高强度激光照射金属表面时,首先材料表面温度达到熔点时,形成一个熔融层;然后温度继续上升直到沸点,蒸发开始。一部分吸收的激光能变为蒸发的潜热、气化质量的动能和喷溅蒸气的热量,其余部分则传给基体材料。在激光功率密度不是很高的情况下,喷溅蒸气对激光不能形成强吸收,系统达到一个稳定状态。相比金属,非金属往往对激光具有很高的吸收率,在金属材料被激光熔化和汽化过程中,金属中含有的 S、P、O 等形成的夹杂物将强烈吸收激光能量而迅速温升、汽化,金属熔体的成分可以得到净化。

随着材料汽化产生的蒸气粒子继续吸收激光能量,蒸气温度继续升高,最后将导致蒸气原子和分子电离,形成带电粒子,蒸气到达一种高温度高带电粒子密度的状态,这种高度电离的气体即称为等离子体。因为它是激光作用下产生的,故也称为光致等离子体。等离子体具有电中性、高导电性、与磁场发生相互作用、粒子间存在集体相互作用等特征。

高功率激光辐照使金属蒸气产生电离的主要机制如下:

- 1) 光电离: 原子中的电子受到激光照射而吸收足够的光子能量,从而发生电离。
- 2) 热电离: 高温下高速热运动的原子相互碰撞,当其电子获得的能量超过电离势,原子发生电离。
- 3) 碰撞电离: 气体中的带电粒子在电场的作用下加速并与中性原子发生碰撞,能量产生交换后原子中的电子获得足够高的能量,而发生电离。

光致等离子体产生后对激光能量有强烈地吸收。吸收的机制有两种: 逆韧致吸收和共振吸收。逆韧致吸收是指等离子体中自由电子在强激光电场中获得能量,并通过与离子的碰撞将能量传递给离子。逆韧致吸收是等离子体吸收激光能量的主要方式,其吸收系数与电子密度、离子密度和等离子体温度有关。共振吸收是一种异常吸收,激光等离子体存在大的密度梯度,电场矢量沿密度梯度方向存在分量,等离子体电荷分离,引起等离子体振荡;当振荡频率恰好是激光频率时,发生共振,吸收激光能量,产生超热电子。由于等离子体对激光的吸收,使激光直接辐射到基体材料的能

量降低。

此外,光致等离子体对激光束有散射作用,导致激光在进入等离子体后发生折射。激光从空气进入等离子体,实际上是从光密介质进入光疏介质,光束的折射使激光的聚焦点位置下移,即等离子体表现出负透镜效应。

当等离子体足够强时,通过其对激光的吸收和折射作用,激光将被屏蔽,即激光能量无法达到材料表面。等离子体对激光的屏蔽作用使被加工材料因输入能量缺乏而温度下降,气化和熔化过程中止,没有后续金属蒸气补充的等离子体在大量吸收激光能量的情况下迅速膨胀并上升,当等离子体稀释、密度大幅下降后,激光束能够再次穿透等离子体而到达材料表面,熔化和汽化过程再次产生,因此等离子体对激光的屏蔽作用具有周期性。

等离子屏蔽对焊接质量有很大的影响。一方面,致密的光致等离子体通过吸收和散射入射光,影响了激光的能量传输效率,大大减少到达工件的激光能量密度,导致熔深减小。另一方面,等离子体改变了激光能量在工件上的作用区,影响了焊缝成形,严重时,等离子体的屏蔽使得焊接过程无法进行。

1.3.3 匙孔效应

当激光光斑上的功率密度足够大时 ($\geq 10^6 \text{ W/cm}^2$),金属在激光的照射下被迅速加热,其表面温度在极短的时间内升高到沸点,使金属熔化和汽化。当金属汽化时,所产生的金属蒸气以一定的速度离开熔池,金属蒸气的逸出对熔化的液态金属产生一个附加压力,使熔池金属表面向下凹陷,在激光光斑下产生一个凹坑。当凹坑底部继续被加热汽化时,所产生的金属蒸气,一方面压迫坑底的液态金属,使小坑进一步加深;另一方面,向坑外逸出的蒸气将熔化的金属挤向熔池四周。这个过程继续进行下去,便在液态金属中形成一个充满金属蒸气的细长孔洞。当金属蒸气的反冲压力、流体动压力等与液态金属的表面张力和重力平衡后,小孔不再继续加深,形成一个深度稳定的小孔。

匙孔形成并稳定后,并假设是一盲孔(非穿透),则有以下几种力达到平衡并维持匙孔的稳定存在:重力 F_g 、表面张力 F_σ 、蒸气压力 F_v 、流体动压力 F_h 和光束压力 F_l ,其中, F_v 、 F_h 和 F_l 维持小孔张开,而 F_g 和 F_σ 则力图使小孔闭合。在平衡状态下,小孔表面任一点处有

$$F_v + F_h + F_l = F_g + F_\sigma \quad (4-1-13)$$

激光焊时,与 F_σ 和 F_v 相比, F_g 和 F_l 相对来说较小,可以忽略。焊接速度不高时, F_h 也可忽略不计。因此,稳定匙孔的压力平衡条件方程简化为

$$F_v \approx F_\sigma \quad (4-1-14)$$

匙孔的出现大大改变了激光与物质的相互作用过程,即材料对激光的吸收大大增强。匙孔通过两种方式吸收激光能量。一方面,通过菲涅尔(Fresnel)吸收机制,即激光在匙孔壁上发生多次反射,每次反射都被孔壁吸收一部分能量,最后激光大部分能量被吸收;另一方面,匙孔内的金属蒸气及其等离子体通过逆韧致吸收机制吸收一部分激光能量。由于匙孔效应,当光束进入匙孔后,匙孔相当于一个吸光的黑体,使对激光能量的吸收率大大增加。

1.4 激光焊原理及特点

激光焊是一种非接触式的高能密度束加工方法,相比于电子束焊,它可在大气中进行,从而避免真空室的限制。激光焊具有热输入小、焊接速度快、焊接变形小、可达焊缝深宽比大、焊接精度高、焊接质量好等优点。激光焊能够焊接高熔点、难熔或难焊的金属材料,也可焊接陶瓷、有机玻璃等非金属材料。随着激光器技术的发展,激光焊技术也从开始时的脉冲激光焊发展到连续激光焊

和激光深熔焊。

激光焊的原理,简单来说,就是利用聚焦后具有一定激光功率密度的激光束对材料进行辐射,通过能量吸收,辐射区域的材料被加热至熔化甚至气化状态,在激光束移开或停止作用后熔化区域凝固而形成焊点或焊缝,实现两个工件的连接。但根据焊接时熔化区域(即熔池)的产生机理,激光焊可以分为激光热传导焊和激光深熔焊。

1.4.1 激光热传导焊原理及特点

采用的激光光斑功率密度为 $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时,激光将金属表面加热到熔点和沸点之间,金属材料表面将所吸收的激光能转变为热能,使金属表面温度升高而熔化。随输入能量增加,热能通过热传导传向金属内部,使熔化区逐渐扩大,凝固后形成焊点或焊缝,其熔深横截面轮廓近似为半球形。这样的激光焊接方法称为激光热传导焊。

激光热传导焊的激光光斑功率密度较小,很大一部分光被金属表面所反射,光的吸收率较低,焊接熔深浅,通常在 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 之间。

1.4.2 激光深熔焊原理及特点

如果激光焊时激光光斑上的功率密度达到 10^6 W/cm^2 数量级或以上,如前面所述,金属在此高功率密度激光照射下将被迅速加热、熔化和气化,最终在熔化金属区域内形成“匙孔”,此深度已稳定的匙孔随着光束的移动而向前移动,匙孔后面的熔化金属凝固而形成焊缝,这样进行的焊接称为激光深熔焊。

激光深熔焊具有熔深大、焊缝深宽比大、热输入极小等特点,适合于焊接一定厚度的金属材料,或者薄板的高速焊接。由于激光功率密度高,焊接过程中会产生大量的金属蒸气和等离子体。

1.4.3 焊接熔池动力学

激光热传导焊时,金属材料只是在激光照射下产生熔化和形成熔池,熔池不出现明显的汽化现象。对于一般金属,液态表面张力随温度升高而降低,热传导焊的熔池中心与四周的温差大,熔池内因温度分布不均匀所造成的表面张力差将驱使溶液从低张力区流向高张力区,即由熔池中心向四周流动,导致中心液面下凹,由此使液面产生的高度差将进一步形成重力梯度。这一重力梯度又将驱使溶液在熔池下部由四周向中心回流,进而完成熔池中的对流循环。

当激光深熔焊过程中匙孔随激光束移动时,匙孔前方形成一个倾斜的烧蚀前沿。在这个区域,匙孔周围存在压力梯度和温度梯度。在压力梯度的作用下,熔化材料绕匙孔的周边由前沿向后沿流动。温度梯度沿匙孔的周边建立了一个前面大后面小的表面张力分布,这进一步促使熔融材料绕匙孔周边由前沿向后沿流动,并最后在匙孔后方凝固形成焊缝。日本大阪大学接合所的 Matsunawa 等人所做的钨颗粒显示熔池流动的试验(见图 4-1-17)发现,在激光深熔焊的熔池中存在

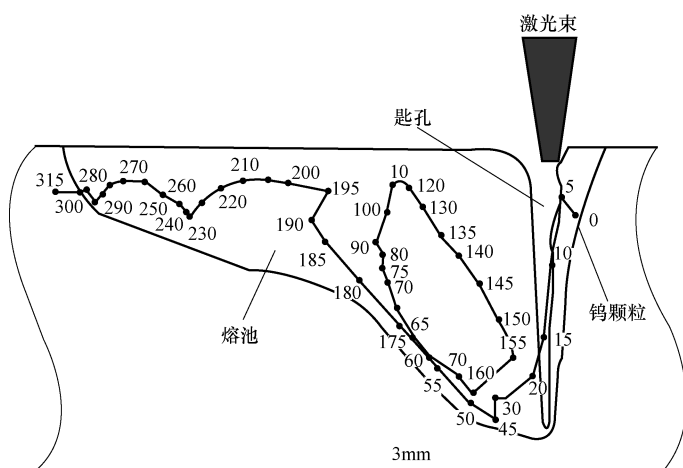


图 4-1-17 激光深熔焊熔池中的钨颗粒流动轨迹图

旋转的涡流构造,且能量较大,有强烈的搅拌力作用。熔池底部产生的较大气泡,并不完全依靠上浮力排出熔池,而且也会靠金属的流动带出熔池。

1.5 激光焊技术与工艺

随着激光技术的大力发展,激光焊在焊接加工中的应用越来越广泛,而各种应用需求,又反过来对激光焊技术不断提出发展的要求。为适应新应用需要和克服原有技术的局限性,新的激光焊技术和方法不断涌现,激光焊技术得到了进一步的发展。

1.5.1 激光热传导焊

1. 技术原理和工艺特点

激光热传导焊就是利用上述提到的以热传导方式,将材料表层吸收的激光能传递到材料内部,并形成熔深的原理进行激光焊。由于激光热传导焊是在激光光斑功率密度 10^5 W/cm^2 以下实现的,熔深的增加靠热传导来实现,其熔深必然有限,所以激光热传导焊主要用于薄(厚度 $< 1 \text{ mm}$)、小工件的焊接加工,且焊接速度较慢。

2. 主要焊接参数及其影响

激光热传导焊采用的激光能量输出形式可以是脉冲的,也可以是连续波。以脉冲激光为热源的焊接也称为脉冲激光焊。相比而言,脉冲激光焊时涉及的工艺参数较多。连续激光焊接时通常涉及激光功率密度(或激光功率)、焊接速度、离焦量、保护气等,而脉冲激光焊接还涉及脉冲能量、脉冲宽度、脉冲波形和脉冲重复频率等脉冲方面的参数。下面以脉冲激光焊为例介绍热传导焊主要的焊接参数和其影响。

(1) 功率密度 热传导激光焊中,功率密度应为 $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 。在此功率密度下,材料表面被加热至熔点和沸点之间,既保证材料充分熔化,又不至于发生汽化,因此不会产生小孔。根据热传导方程,可求出一定脉冲宽度条件下,在所确定材料的既定物性范围内达到某一温度所需的功率密度。在恒定激光强度的表面热源作用下,表面达到材料熔点的功率密度 q_{c1} 为

$$q_{c1} = \frac{0.886 T_m K}{(\alpha \tau_1)^{0.5}} \quad (4-1-15)$$

表面达到沸点功率密度 q_{c2} 为

$$q_{c2} = \frac{0.886 T_v K}{(\alpha \tau_1)^{0.5}} \quad (4-1-16)$$

式中 T_m ——熔点温度 (K);

T_v ——沸点温度 (K);

K ——热导率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$];

α ——热扩散系数 (m^2/s);

τ_1 ——脉宽 (s)。

可以看出,激光功率密度随材料熔点温度 T_m 、沸点温度 T_v 、热导率 K 的增加而增加,随热扩散系数 α 和脉冲宽度 τ_1 的增加而减小。

(2) 脉冲能量与脉冲宽度 用脉冲激光焊时,与连续激光焊时的功率密度或功率参数相类似的就是脉冲能量,当然,脉冲能量和脉冲宽度两个参数共同才决定了脉冲期间的功率值。

脉冲能量主要影响金属的熔化量,当脉冲能量增加时,熔化区的深度和直径都增加。

激光脉冲宽度是激光热传导焊区别于材料去除的重要参数,也是决定加工设备造价及体积的

关键参数。脉冲宽度主要影响熔深，多数情况下的脉宽根据熔深要求而确定。当脉冲能量一定时，脉冲宽度存在一个最优值，使熔深最大。脉冲宽度越大，焊接时间越长，热影响区大，如果对热影响区大小有严格要求，应严格控制脉宽。如果热影响区允许，适当增大脉宽有利于提高焊接过程的稳定性。

(3) 激光脉冲波形 不同的激光脉冲波形，对焊接产生不同的影响。随着电子技术的发展，已经能够比较方便地获得任意波形的激光脉冲。如果要保证材料表面温度维持在熔点和沸点之间，可以通过热传导方程求出焊接材料在不同时间所需的激光功率密度，据此确定所需的激光脉冲波形。

在脉冲作用期间，初始时材料表面温度低，金属材料对激光的反射率高；随着激光能量继续照射作用，材料表面温度升高，激光反射率下降。因此，可以采用有前段尖峰的波形（见图4-1-18），这种波形可使金属表面温度迅速上升到熔点，尽快降低材料对激光的反射率，这种波形适用于高反射率金属，如有色金属。对于较低反射率的金属如某些黑色金属，则采用激光波形比较平坦。对脉冲重复率较高的焊缝，不宜采用前段尖峰脉冲，因为采用前段尖峰脉冲易出现金属高度汽化，产生飞溅和孔洞。

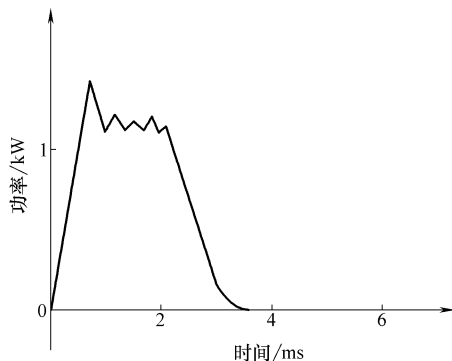


图4-1-18 带前段尖峰的激光波形示意图

(4) 离焦量 当激光焦点位置位于工件表面上方时，称为正离焦；焦点位置位于工件表面下方时，即位于材料内部时，称为负离焦；刚好位于工件表面时，则称为零离焦。激光焊通常需要一定的离焦量，因为激光焦点处光斑中心的功率密度过高，容易蒸发成孔，离开激光焦点的各平面上，功率密度分布较为均匀。

当正负离焦量相等时，所对应平面上功率密度近似相同，但实质上获得的熔池形状是不同的。当负离焦时，材料内部功率密度比表面还高，易形成更强的熔化、汽化，使光能向材料更深处传递，因此获得更大的熔深。在实际应用中，要求熔深较大时，采用负离焦；焊接薄材料时，宜用正离焦或零离焦。

1.5.2 激光深熔焊

1. 技术原理和工艺特点

激光深熔焊的技术原理就是利用本篇1.4.2节所描述的原理形成大深度、大深宽比的熔池。因为形成的熔深大，激光深熔焊适合于较厚材料的焊接和高速焊接。与其他焊接方法相比，激光深熔焊工艺具有以下特点：

(1) 大深宽比的熔深 熔融金属是围着圆柱形的高温蒸气腔体（匙孔）而形成，并随着匙孔的深入而向工件内部延伸，形成的焊缝因此深而窄。

(2) 高致密性焊缝 充满高温蒸气的匙孔对焊接熔池有强烈的搅拌作用，有利于熔池中的气体逸出，熔透时匙孔内蒸气能更好地被排出，最终生成无气孔的熔透焊缝。焊后的高冷却速度又易使焊缝组织细化。

(3) 很小的焊接变形 由于聚焦激光比常规焊接方法具有高得多的功率密度，导致焊接速度快，焊接热影响区窄，而且焊缝往往为熔透型，故焊接变形很小。

(4) 显著的光致等离子态现象 由于深熔焊时所用激光功率密度高，匙孔内的金属蒸发强烈，在高功率密度激光的持续作用下金属蒸气大量电离，从而在匙孔开口附近形成等离子体。如果等离子体不加以抑制，则会影响焊接过程，因此需要采用保护气流进行吹除。

2. 主要焊接参数及其影响

影响激光深熔焊接过程的焊接参数很多,几个主要的焊接参数影响如下:

(1) 激光功率 激光焊中存在一个激光功率密度阈值,达到或超过此值,熔深才会大幅度提高。只有当工件上的激光功率密度超过阈值(与材料有关),等离子体才会产生,这标志着稳定深熔焊的实现。一般来说,在焊接速度一定的情况下,焊接熔深随着激光功率的增加而增加。

(2) 焦点位置 激光焊时,为了达到一定的功率密度,焦点位置至关重要。激光焦点与工件表面相对位置的变化直接影响焊缝宽度与深度。通常在焊接薄板时,采用正离焦或者零离焦。在焊接厚板时,通常采用负离焦以增加熔深。

此外,焦点的位置也会对熔深的横截面形状产生影响。当焦点处于工件表面上方较远的位置时,熔深不仅减小,上部熔宽也明显增加,深熔形状具有“钉头”形特征;当焦点处于工件表面或略微在其下面,熔深横截面两侧比较平行,上部熔宽也不明显;当焦点置于工件表面以下较深的位置时,熔深横截面成V形;如焦点再进一步下移,则熔深下降,甚至深熔焊效果消失。

(3) 焊接速度 激光功率一定的情况下,焊接速度大小直接决定着焊接热输入的多少。提高速度会使熔深变浅,但速度过低又会导致材料过度熔化。对一定厚度的某特定材料来说,要获得合适的熔透焊缝,激光功率和焊接速度必须匹配良好。

(4) 保护气体种类、方式和流量 激光深熔焊过程中的保护气体主要用来吹走焊接时产生的等离子体,以免等离子体对于激光能量的过度吸收和散射。同时保护气体可以保护金属熔池免于在焊接过程中被氧化。另外,保护气体可以使激光聚焦透镜免受金属蒸气污染和液体熔滴的溅射。一般采用氦、氩、氮等气体作保护气体。氦气不易电离(电离能量较高),可让激光顺利通过,光束能量不受阻碍地直达工件表面。这是激光焊时最有效的保护气体,但其价格比较贵。氩气密度较大,保护效果较好,且较便宜。氩气易受高温金属等离子体作用而电离,与原有的金属等离子体混合而进一步加强了等离子体现象和等离子体的屏蔽作用,结果减小了到达工件的有效激光功率,降低了焊接速度与熔深,甚至使焊接无法进行。氮气作为保护气体最便宜,但对某些材料焊接时并不适用,主要是由于冶金学方面的问题,容易在焊缝中产生气孔。

保护气体可以是同轴保护气体,也可采用侧向喷嘴保护。采用侧吹方式保护时,喷嘴的形状与角度非常重要。从喷嘴喷出的保护气体最好能覆盖全部的熔池,又能恰好吹走熔池上方的等离子体。

保护气体的流量也很重要,流量小起不到保护作用,流量太大将引起熔池的剧烈翻滚,容易在焊缝中形成气孔。

(5) 激光终止控制 激光深熔焊时,不管焊缝深浅,小孔现象始终存在。当焊接过程终止激光突然关闭时,焊缝尾端将出现大的凹坑。在焊接正式产品时如果留有大的凹坑就造成焊缝明显的缺陷。为了防止上述现象发生,可对焊接终点编制程序,使激光功率在一个短时间内由设置功率逐渐降至零值或较小功率,可以有效减小焊缝尾端的凹坑。

1.5.3 激光填丝焊

1. 技术原理

激光自熔焊是只纯粹采用激光束且不添加填充材料的激光焊,具有能量密度高、能量集中、焊接速度快、焊缝深宽比大、焊接变形小、无需真空环境等优点,使激光焊有着广泛的应用潜力,但也存在一定的局限性,即对被焊件的装配精度要求很高。如在大尺寸薄板对接时,对于厚度为1mm的薄板,0.1mm或以上的间隙就会造成焊缝的明显下凹,使其力学性能和外观都达不到要求。又如在大型客机机身壁板制造中,1.8mm厚的薄板铝合金激光焊时,也对装配间隙提出了非常高的要求,并且极易出现焊缝下塌现象,严重影响了焊接接头的力学性能。在实际生产中,装配间隙

往往难以满足这样严格的要求,大大限制了激光焊的应用。而激光填丝焊接就是在这种情况下提出的一种焊接工艺。

激光填丝焊接原理如图 4-1-19 所示,通过一个送丝导嘴送入填充焊丝至激光辐射区域,焊丝从焊接前方送入,也可从焊接后方送入;焊丝一部分由激光照射而熔化,一部分由激光诱导产生的等离子体加热而熔化,还有一部分通过熔池对流带来的热量而熔化;同时由喷嘴吹入气体保护焊接区和吹除光致等离子体。喷嘴可以是与导丝嘴分离的单独喷嘴,也可以是和导丝嘴合为一体,形成一个同轴组合的喷嘴。

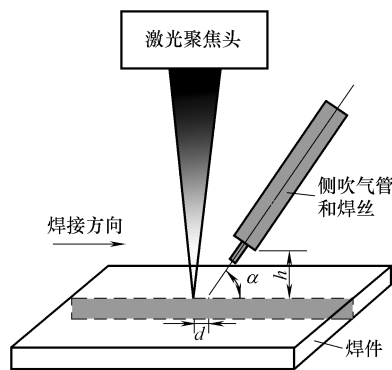


图 4-1-19 激光填丝焊接原理示意图

2. 工艺特点

激光填丝焊是在一般的激光焊过程中,连续填送焊丝进入熔池,实现加入填充金属的焊接工艺。与一般激光焊相比,其优点如下:

- 1) 降低了产品结构焊接前的装配精度要求,适应产品工业化生产的需要,扩大激光焊的应用范围。
- 2) 通过选定填充材料,改善了填充金属的冶金行为,获得所需要的焊缝成分及性能。
- 3) 对于厚板对接焊,可采用开窄坡口的多道焊接工艺,以较低激光功率来完成较厚板的焊接,避免高输入功率带来的高热输入对焊接接头质量的不利影响。
- 4) 通过填充材料,改善焊缝成形,避免焊接表面凹陷、咬边等缺陷,提高接头质量。

激光填丝焊也有一定的缺点。研究表明,它对焊丝指向性和焊接参数设置的要求极为严格,特别是对送丝机构的送丝精度有严格的要求。另外,不同材料、不同规格的焊丝对焊接速度和送丝速度的匹配要求也不同,并且得到理想焊缝的匹配值区间非常窄。因此,在焊接过程中,如果焊接工艺不当,容易出现顶丝和粘丝,使焊接过程中断。总之,焊丝送进过程的任何干扰,均可能引起焊缝缺陷的产生。

3. 主要焊接参数及其影响

激光填丝焊的焊接参数众多,且相互之间的影响比较复杂,主要焊接参数有:激光功率、焊接速度、保护气体种类及流量、焊丝种类、送丝方式、光丝间距、送丝速度等,这里对前三种焊接参数的影响不再叙述。

(1) 焊丝种类 一般来说,在焊接合金材料时,填充金属对焊缝金属、焊接接头的物理和化学性能均有颇大的直接影响,因此,填充材料的选择极为重要,原则上应该能够保证焊接接头的使用性能,保证焊缝金属具有良好的力学性能和综合性能,保证焊缝具有一定的致密性,即没有气孔、夹渣、或者气孔和夹渣的数量、尺寸、形状不超过允许值,能够防止在焊接接头内部产生冷裂纹和热裂纹,具有良好的工艺性。

(2) 送丝方式 焊丝的填充方式有两种,即前送丝和后送丝。前送丝即焊丝从熔池前部送入,焊丝端部在激光聚焦光斑附近,焊丝先受到激光光斑的加热而熔化,进入熔池。而后送丝方式,是指焊丝从熔池的后侧送入,并指向光斑,熔化后进入尾部并迅速凝固,不同材料、不同焊接参数下,要选择合适的送丝方式,一般情况下,前送丝的抗干扰能力较强。

(3) 光丝间距 在激光填丝焊过程中,光丝间距,即焊丝端部与光斑的距离,对于焊丝能否顺利熔化、熔滴能否顺利过渡进入熔池具有重要的影响。因此,有必要确定激光填丝焊过程中允许的焊丝端部和光束之间的距离,图 4-1-19 中 d 即为光丝间距。试验发现,焊丝端部与光斑的距离保持在一定的距离以内,均可以顺利地完填充丝焊接,焊缝成形良好。分析认为,当焊丝端部与光斑的距离超过最小值时,此时焊丝与光束的相交处和焊缝表面有一定的距离,这使得焊丝处于激光束的较大的正离焦范围内,激光的能量密度较小,不能有效熔化焊丝,焊丝基本上又处于等离子体

层的上部,熔化能力有限,导致焊丝不能正常熔化。而当焊丝端部与光束距离超过特定距离时,由于距离较远,得不到激光能量和光致等离子体的充分加热,而此时与焊丝接触的母材尚未熔化,因此导致焊缝表面成形出现不均匀现象,甚至焊丝会因未熔化而发生顶丝。因此焊接时要保证激光光斑与焊丝端部的距离在设定的范围内,光丝间距是影响激光填丝焊的焊接过程稳定性的重要因素。

(4) 送丝速度 对于送丝速度的影响,应当与焊接速度一起来讨论。在功率一定的前提下,焊接速度与送丝速度的关系对于激光填丝焊的影响非常重要。对于特定的送丝速度,如果焊接速度过快时,热输入较小,焊丝不能连续熔化,会使焊缝成形不连续;如果焊接速度过慢,热输入较大,焊丝填充不足,焊缝成形也不佳。对于一定的焊接速度,送丝速度过快,焊丝不能连续熔化,焊缝成形不良;送丝速度过慢,焊丝填充量不够,接头的截面形状不理想,不能形成良好的余高,达不到填丝应有的作用,因此确定焊接速度和送丝速度的匹配关系是非常重要的。

1.5.4 激光-电弧复合焊

激光-电弧复合焊可以有效利用激光和电弧热源,充分发挥两种热源各自的优势,互相弥补对方的不足,在较小的激光功率条件下获得较大的熔深,提高激光焊对装配间隙的适应性,稳定焊接过程,降低激光应用成本,实现高效率、高质量的焊接。

在激光-电弧复合焊过程中,不但电弧本身的能量参与焊接过程,而且还可以对焊件产生预热效果,提高母材表面对激光的吸收率,从而显著增大焊接熔深,降低激光功率,降低激光设备及其运行的成本。电弧加热还可以减缓激光焊焊后的冷却速度,减轻或消除凝固裂纹和缩松、气孔、咬边等焊接缺陷。采用不同能量的激光和电弧进行组合,可以获得深宽比不同的焊缝,提高了焊接的适应性。电弧的存在使焊缝熔宽变大,降低了对间隙、错边、对中的精度要求,减轻了劳动工作量,提高了生产效率。

1. 技术原理

激光-电弧复合焊是将物理性质和能量传输机制截然不同的两种热源复合在一起,同时作用于同一熔池上,既发挥了两种热源各自的优势,又相互弥补了各自的不足,从而形成了一种全新高效的热源。激光电弧复合焊中的电弧可以是非熔化极电弧或熔化极电弧;激光与电弧的耦合可以是同轴的,也可以是旁轴的。非熔化极电弧,即 TIG 电弧或等离子弧的加入,可以实现激光作用区材料的预热,提高材料表面对激光的吸收率,促进激光能量的有效利用。它能充分发挥激光电弧复合效果,既促进激光吸收和激光熔深又提高接头间隙容忍度和焊缝冶金质量。目前应用最广泛的是熔化极气保护电弧与激光的复合,因为熔化极电弧中还同时加入了焊接填充材料。这种复合焊采用的是旁轴耦合方式,其原理如图 4-1-20 所示。

2. 工艺特点

激光-电弧复合焊由于综合了两种不同的热源,因而也具有其独特的工艺特点。

(1) 增大焊接熔深 大量试验表明,激光-电弧复合焊可以明显增大各单一热源焊所得熔深。在一定的焊接参数下,激光与电弧发生协调作用,此时复合焊的熔深甚至可能要大于各单一热源焊接所得的熔深之和,这就为小功率激光器代替大功率激光器焊接金属材料提供了可能,同时降低焊接成本。

(2) 降低焊接间隙要求 纯激光焊时,由于激光束直径较小,从而要求焊接间隙较小。在激光平板对接焊中,间隙裕度应小于 0.1mm。而在复合焊中,由于电弧的热作用范围、热影响区较

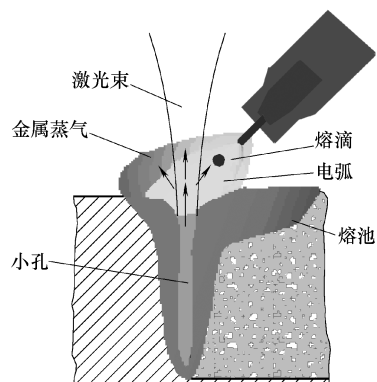


图 4-1-20 激光-电弧复合原理示意图

大,同时焊丝的熔化提供了填充金属,这使得焊接区域增大,可缓和对接口精度的要求。此外,复合焊也可进行错边量达其板厚(0.5~3mm)80%的平板焊接。

(3) 增加焊接速度 在非熔化极复合焊中,电弧的能量输入起到辅助加热的作用,可以在短时间内迅速将母材熔化,增大了激光的吸收率,从而增大了焊接速度。如在 CO_2 激光和MAG复合焊时,对于同样的熔深,复合焊速度与单一激光焊相比,增加了大约50%。此外,速度的增大也使其热输入减小,焊后变形也随之减小,因而减少了焊后矫形的工作量,使加工成本降低,生产效率提高。

(4) 可改善焊缝成形,获得优质焊接接头 激光-电弧复合焊与纯激光焊相比,能够添加合金元素调整焊缝金属成分,并可消除焊缝凹陷;同时,其温度梯度较小,冷却、凝固过程较缓慢,有利于气体的排出,降低内应力,减少或消除气孔和裂纹,从而获得优质的焊接接头。

3. 激光与电弧的相互作用

激光-电弧复合焊中两种热源相互协调,互补不足,形成了一种增强适应性的焊接方法,其相互作用机理主要包括以下方面。

(1) 激光压缩电弧 在激光束辐射下,金属汽化、电离产生高温、高密度的激光等离子体。在激光焊时,等离子体吸收、散射激光能量,降低激光束的穿透能力和焊接效率。然而,当激光与电弧复合后,等离子体作用有所不同,激光等离子体为电弧提供了一条导电通道,且电阻最小,因此,大部分电子通过该通道流入工件,电弧体积被压缩了。随着电弧体积被激光压缩,电弧电流密度也增加。复合激光后电弧电流密度一般比原来提高2~4倍。

(2) 激光引导电弧 电弧焊接阳极区的导电机构主要是电场电离形成的阳极斑点,且通常它容易漂移,当加入激光后,激光焊形成的小孔附近的等离子体为电弧提供了一个非常稳定的阳极斑点,而且小孔处温度较高,从而导致电弧偏向小孔处。这种现象在高速焊接时尤为明显。对于电弧焊,当焊接速度超过2m/min时,就不能形成稳定的电弧,而与激光复合后,即使焊接速度能提高到10m/min,电弧仍然被牢牢地固定在激光焊所形成的小孔处。另外,加入激光能够使电弧引燃变得更容易。

(3) 电弧稀释激光等离子体 当附加小电流电弧时(30~50A),激光焊时的等离子体的密度可以被降低。这种稀释作用降低激光焊时等离子体对激光的散射、吸收,进而增加材料对激光的吸收率,增加熔深。这种稀释作用仅限于小电流电弧,随着电流增加,电弧温度也不断升高,体积不断膨胀,等离子体对激光的阻碍作用随之增加。激光的能量大部分用于加热电弧,导致电弧的体积进一步膨胀。在这种条件下焊缝熔宽较大,熔深反而减小。

下面分别以激光-TIG和激光-MIG电弧复合热源焊为例描述激光与电弧的相互作用。

由于TIG焊不存在熔滴过渡对焊接熔池的影响,在激光-TIG电弧复合热源焊过程中,熔池匙孔的稳定性较好。焊接过程中,激光在熔池中形成的匙孔对电弧具有吸引作用,增加了焊接过程的稳定性,同时,由于匙孔的存在,电弧根部尺寸被压缩,使得电弧的电流密度大大提高,有效增大了电弧能量的利用率。尤其是对于 CO_2 激光,焊接过程中的光致等离子体较多,对电弧的影响也更明显。

有研究表明,在小电流时,电弧等离子体对激光的屏蔽作用相对较弱,电弧的挺度也较小,激光匙孔可以稳定存在,此时非常有利于弧根压缩与吸引,复合电弧电流能量密度很大,可以获得较大的熔深,表现为复合熔深焊特征。当电流增大到某一临界值时,电弧温度很高、挺度大,电弧等离子体对激光的屏蔽作用增大,激光穿过电弧后能量损失很大,到达工件表面的激光能量不足以维持匙孔的存在,电弧弧根不再被压缩,电弧电流密度随之降低,仅能获得浅而宽的焊缝截面,焊缝特征表现为热传导焊接。而且,激光功率越大,对电弧的吸引、压缩能力越强,复合热源焊接机制转变的临界电流越高。此外,复合焊接机制的转变还与激光束和电弧的复合方式(同轴或者旁

轴)、作用位置、激光能量的输出形式(脉冲或者连续波激光),以及激光的波长等因素有关。

相比之下,激光-MIG 电弧复合焊由于存在熔滴过渡问题,因此,激光对电弧形态的影响不如激光-TIG 复合焊那么明显,更重要的是其改变了熔滴的过渡方式,对熔滴过渡频率及熔滴过渡的稳定性都有明显影响。

有研究表明:激光的引入使得 MIG 焊短路过渡的熔滴过渡频率降低,同时,复合热源焊接时熔滴的尺寸增大,熔滴长大时间更长,即降低了过渡频率。对于喷射过渡焊接,激光的加入使得复合焊的熔滴过渡变得相当复杂,这主要取决于复合焊过程中的保护气体流量、激光束和电弧的作用位置以及激光束离焦量等焊接参数的综合影响。此外,采用激光-MIG 复合焊,电弧的引弧特性得到较大改善。

4. 主要焊接参数及其影响

由于电弧的引入甚至熔化焊丝的加入,激光电弧复合焊的工艺复杂,焊接参数多,对焊接过程和结果影响复杂。以激光-熔化极电弧复合焊为例,其焊接参数主要有激光功率、电弧电流、电弧电压、焦斑尺寸、离焦量、焊接速度、激光与电弧夹角、激光电弧间距、送丝速度、保护气成分和流量等。其中,激光功率、焦斑尺寸、离焦量、焊接速度等,与前述的激光焊方法工艺相似,而电弧的电流和电压、保护气以及送丝速度对焊接的影响也基本类似于常规熔化极气体保护焊,故在此仅介绍激光电弧间距对复合焊的影响。

以高功率 CO_2 激光和小电流 MIG 电弧复合焊接为对象,观察激光与电弧的间距会对电弧和熔滴过渡产生的影响。试验采用激光功率 12kW 和 MIG 电弧电流 250A,在激光加入前和激光与电弧间距 4mm 的熔滴过渡变化的高速摄影图像如图 4-1-21 所示。从图中可以看到,激光光致等离子体对熔滴过渡形式的改变有明显影响。单独 MIG 焊时熔滴过渡形式为复杂的不稳定的混合过渡,加入激光后变为单一的射流过渡,过渡频率增加,过渡过程稳定,基本没有飞溅,焊缝表面成形美观。图 4-1-22 所示,对应的电流和电压波形,在激光-MIG 电弧复合焊接段,电流和电压的信号非常稳定,没有短路。当激光与电弧间距过大时,激光与电弧的耦合作用降低,MIG 侧的熔滴过渡又会不稳定。图 4-1-23 所示为激光电弧间距 12mm 时拍摄到的熔滴过渡影像,其中各图的左下角处的亮斑即为激光作用区,可见激光与电弧间已没有等离子体耦合作用。此时熔滴过渡主要有两种形

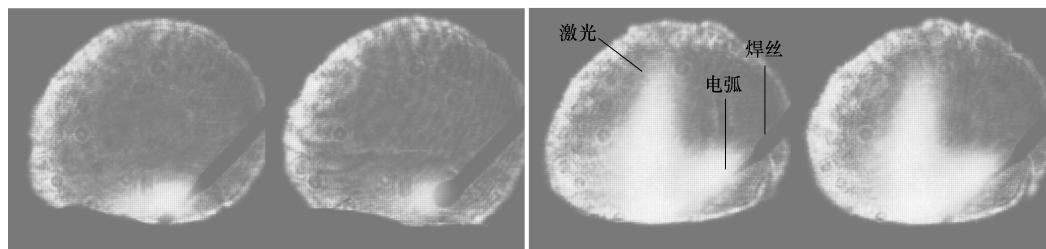


图 4-1-21 单独 MIG 焊和激光与电弧间距 4mm 时熔滴过渡变化的高速摄影图像

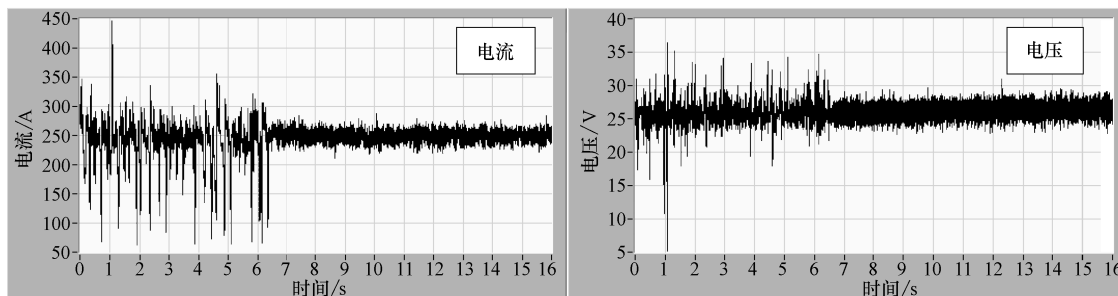


图 4-1-22 单独 MIG 焊和激光与电弧间距 4mm 时电弧电流和电压波形图

式,即短路过渡和射流过渡,两种过渡形式交替进行,过渡过程不稳定。如图4-1-24所示,对应的电流和电压波形,在单MIG焊接段和激光-MIG电弧复合焊接段,电流和电压波形的波动都比较剧烈,过渡形式没有发生变化,这主要是由于激光光致等离子体距离电弧等离子体较远,对电弧的吸引力大大减弱,同时激光光致等离子体对熔滴的辐射作用也减弱,因而对熔滴的过渡过程影响很小。

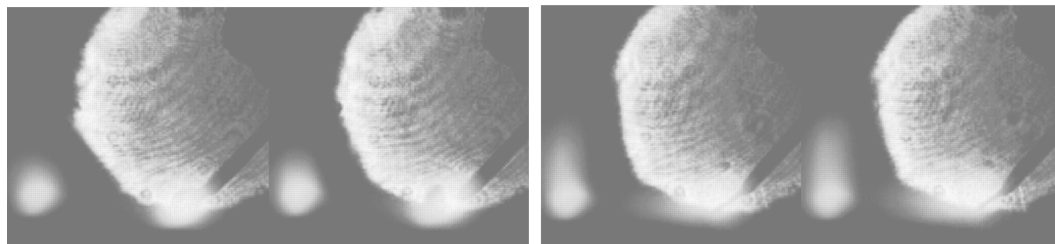


图4-1-23 激光与电弧间距12mm时熔滴过渡变化的影像

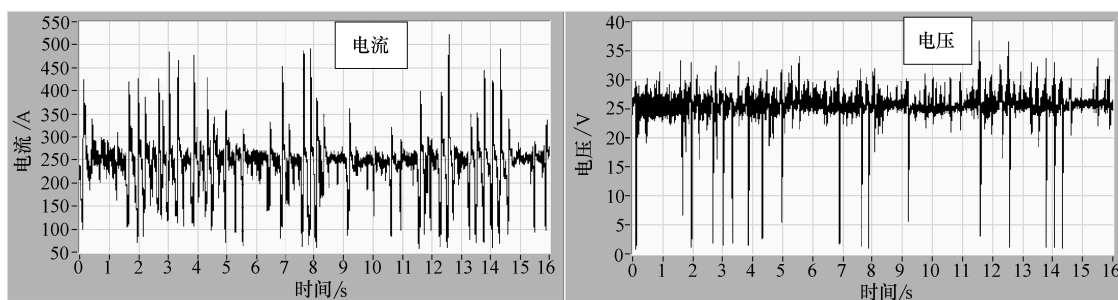


图4-1-24 激光与电弧间距12mm时电弧电流和电压波形图

1.5.5 双光束激光焊

在20世纪90年代,双光束激光焊成为了激光焊的一个新的研究方向。双光束激光焊是在焊接过程中同时使用两束激光,可灵活调节光束的排列方式、光斑间距、两束光所成的角度、聚焦位置以及两束光的能量比等相关参数提高焊接的适用性。双光束激光焊方法的提出,主要是用于解决激光焊对装配精度的适应性和提高焊接过程的稳定性,改善焊缝质量,尤其是为一些采用传统激光焊效果较差的薄板焊接、铝合金焊接以及一些复杂的焊接提供了解决方案。

1. 双光束激光焊原理

目前的双光束焊接的研究主要集中在使用两束平行光作为热源,把一束激光通过分光装置分成两束平行光,或用两台激光器分别产生的激光在传输光路中耦合,然后通过聚焦镜聚焦成两个光斑,通过对折射镜或聚焦镜活动部分的调节来调节光斑间距。在已报道的双束激光焊接系统中,大多为两束YAG激光的组合,因为用光纤导光的激光工作头便于操作。也可通过特殊的光学仪器综合其他类型激光。双束激光组合的系统在不断变化的光斑间距和两激光束的功率比率情况下更为灵活。分光形成的双激光束几乎是平行的,并且具有相同的偏振(相干)面。双光束的排列方式有两种方式:一种是沿焊缝方向成串列式排布,一般用于降低冷却速率,减少了焊缝的淬硬性和气孔的产生;另一种是在焊缝两侧并列排布或者交叉排布。在这些情况中可以获得较小的光斑间距,可提高对焊缝间隙的适用性。在串联式和并列式两种双光束焊接工艺之间的焊接机理和对激光焊结果影响的区别被认为是微小的。

2. 双光束激光焊焊接参数

双光束激光焊时,除了单光束激光焊时涉及的激光功率、焦斑尺寸、离焦量、焊接速度和保护气体等参数以及上面已提到的光束排列方式之外,还主要涉及光斑间距、两束光之间的夹角以及两束光的功率比等参数。

(1) 光斑间距 光斑间距会直接影响到焊接熔深的形成机制。以串联式排布的双光束激光焊为例,根据光斑间距的不同,存在三种类型,如图 4-1-25 所示。第 1 种类型为大光斑间距的双光束工艺,其中一束光的功率密度较大,聚焦于工作表面,用于在焊接中产生匙孔;另一束光功率密度较小,只作为焊前或者焊后热处理的热源。在此情况下,焊接熔池的冷却速度减小,该特点有利于一些裂纹敏感性大的材料减少裂纹的产生,如中碳钢或合金钢等。另外,焊缝金属和热影响区中的贝氏体组织增加,并有望改善焊缝的韧性。第 2 种类型为两个激光束在同一焊接熔池中各自生成独立的匙孔,融熔金属的质量流动模式被改变,有助于防止咬边、焊道凸起等缺陷的产生,改善焊缝成形。在第 3 种类型中,光斑间距小,两个光束产生一个共同的匙孔并与材料相互反应。与单光束激光焊相比,此时的匙孔尺寸变大,不易闭合,焊接过程更加稳定,气体也更容易排除,有利于减少气孔、飞溅,获得连续、均匀、美观的焊缝。在交叉的双束激光焊接中,产生了漏斗型的匙孔,匙孔尺寸稳定并不易坍塌,增加了焊接的稳定性和连贯性,焊接质量也得到了改善。

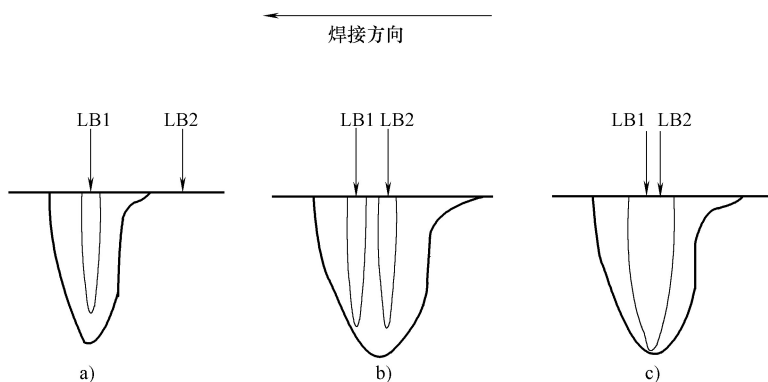


图 4-1-25 串联式双束激光焊不同光斑间距下焊接机理示意图

a) 第 1 种类型 b) 第 2 种类型 c) 第 3 种类型

(2) 光束间夹角 当两光束之间存在一定夹角时,则共同形成的匙孔可为漏斗形状,匙孔尺寸变大且更稳定,也可提高焊接质量。

(3) 两光束的功率比 两光束的功率之比对焊接质量也有显著的影响。对于用于预热或后热作用的光束,其功率和功率密度都不需要太大,会显著低于形成熔深的激光束功率值。对于串联排列且均聚焦在材料表面位置的激光束,任一光束都能形成深熔效果,但通常前置光束的功率较大,以形成必要的熔深;后置光束功率不超过前置光束,主要是扩大匙孔开口尺寸或改善熔池金属流动。

1.5.6 激光钎焊

在现代工业生产中,应用耐蚀镀层板材的领域越来越广。在众多的钢铁防腐方法中,镀锌是一种非常有效而且经济的方法。大量镀锌板材应用在汽车制造业、建筑业、通风和供热设施以及家具制造业等领域。锌的熔点约为 420°C ,汽化温度为 906°C ,非常不利于焊接,电弧等热源刚一接触到镀锌板,镀锌层就挥发。锌的挥发会导致气孔、未熔合及裂纹等诸多缺陷,而且大量锌的挥发会使母材的耐蚀性下降。采用激光钎焊技术,避免了镀锌层的挥发,可得到较高质量的焊缝。

1. 激光钎焊原理

激光钎焊是以激光作为加热源,将钎料熔化,而基体材料本身不发生变化。钎焊所用的填充金属(即钎料)的熔点比母材金属的熔点低,通常钎料以焊丝的形式填充到钎焊缝中(见图4-1-26)。激光钎焊过程中,母材和钎料被激光热源加热至钎料熔化的温度(钎焊温度)上,利用液态钎料和母材的润湿和毛细填缝作用,填满接头间隙,并与母材金属发生相互作用,激光加热停止后,焊接部位迅速冷却,钎料凝固,从而形成可靠的焊接接头。采用激光钎焊技术代替熔焊及电弧钎焊技术,在焊接速度、热输入控制、焊接柔性化及钎焊质量上具有优势。

2. 激光钎焊工艺特点

激光钎焊的核心部件是激光器,激光钎焊系统的发展主要是激光器的发展。可用于焊接的激光器种类繁多,根据其种类不同,也可分为 CO_2 、YAG固体和半导体三种激光钎焊激光器。 CO_2 激光器产生的激光辐射一般在远红外区段,波长为 $10.6\mu\text{m}$, CO_2 激光器辐射波不能通过光纤进行传输,为二维焊接,操作不太方便,使得 CO_2 激光钎焊系统不能充分发挥激光钎焊系统应有的优势。YAG激光器波长为 $1.06\mu\text{m}$,波长较短,有利于激光的聚焦和光纤传输,也有利于金属表面的吸收。由于YAG激光与等离子体的相互作用比 CO_2 激光小得多,大功率、低速度YAG激光钎焊具有良好的发展前途。YAG激光钎焊在实际应用中也较广。半导体激光器又称激光二极管LD或注入型激光器,它是一类电流激励的理想的光子元器件,最常见的是GaAlAs-GaAs双异质结激光器,其输出波长为 $0.75\sim 0.89\mu\text{m}$,辐射能量更易被钎料吸收,比YAG激光效率更高,所需能量更少。

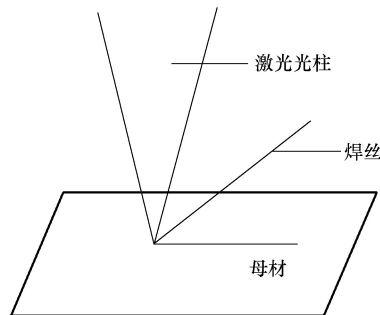


图4-1-26 激光钎焊示意图

由于激光加热迅速、光斑直径较小,导致钎料与母材相互作用时间较短,焊接过程对钎焊工艺要求严格,其工艺的适应性有待提高。在此基础上,出现了双光束激光钎焊技术,双光束激光任意组合进行钎焊,对钎焊温度场的控制更加容易,能够提高钎焊工艺的适应性,改善钎料的润湿性,提高钎缝质量。另外,在激光钎焊过程中,如果焊丝先行预热(热丝激光钎焊),可以增加钎焊的填充量,从而提高钎焊速度。总之,激光钎焊相比其他钎焊方法具有如下优点:

- 1) 速度高。
- 2) 可精确调节热输入,控制钎料的铺展。
- 3) 可焊接复杂的几何形状。
- 4) 热输入低,镀锌层烧损少。
- 5) 焊缝成形好、质量稳定,焊后仅需简单处理甚至无需处理,显著降低处理成本。
- 6) 易实现自动化。

3. 激光钎焊焊接参数影响

(1) 激光功率 对于激光钎焊激光主要用于对填充金属的加热上,并对基体材料进行预热。不同激光功率的焊丝熔化度相差较大。当激光功率过低时,焊丝金属和母材金属无法形成较好的冶金相,直接影响接头强度。在允许范围内应适当选用较大的功率。

(2) 离焦量 离焦量不仅影响工件表面光斑直径的大小,而且对整个激光钎焊的机理有着至关重要的影响。为了使激光产生的光热效应能充分熔化焊丝,因此激光的光斑不能太小,选用合适的离焦量才能保证足够的能量来熔化填充材料,否则就无法实现焊接。

(3) 焊接速度 激光钎焊的焊接速度主要根据焊件的结构特点要求和接头实际焊接性能决定。接头单位面积上接受的热量同光束能量密度和照射时间成正比,光束强度与照射时间的乘积就是供给焊件的能量。当激光能量密度确定时,调节焊接速度可以改变接头所接受的热量。

(4) 送丝速度 在单位时间能量确定时(即激光功率和焊接速度确定时),接头单位面积接受的能量取决于送丝速度。送丝速度大,则单位面积的接头受到的激光辐射能量减小,有可能造成焊丝不完全熔化;送丝速度小,则可能把激光能量过多地传递到母材上,造成镀锌钢板烧损过度。

(5) 激光光斑与焊丝端部距离 在激光钎焊过程中激光光斑和焊丝端部距离是决定激光能量分配的重要参数。焊丝的主要熔化区域是在激光光斑的正下方,激光的主要能量是用来使焊丝熔化并且在一定程度上用一部分光辐射加热母材金属,从而使焊丝金属熔体和母材紧密结合。因此焊丝端部与激光光斑的距离就决定了焊丝熔化能量的来源。

总之,随着激光器制造技术的进步,激光钎焊技术也有较大提高,激光器部件和系统成本将显著下降,激光钎焊技术也将会被普遍推广应用。

1.6 激光焊应用实例

在本节中,通过一些较为具体的激光焊应用实例,介绍相关激光焊方法的应用。

1.6.1 法兰-管端环缝的激光深熔焊

近年来激光深熔焊技术在汽车、航空航天、造船、新能源等领域得到越来越广泛的应用。20世纪80年代后期,千瓦级激光成功应用于工业生产,而今激光焊生产线已大规模出现在汽车制造业,成为汽车制造业突出的成就之一。德国奥迪、奔驰、大众及瑞典的沃尔沃等欧洲的汽车制造厂早在20世纪80年代就率先采用激光焊等进行车顶、车身、侧框等钣金焊接,20世纪90年代美国通用、福特和克莱斯勒公司竞相将激光焊引入汽车制造,尽管起步较晚,但发展很快。日本的日产、本田和丰田公司在制造车身覆盖件中都使用了激光焊,高强度激光焊装配件因其性能优良在汽车车身制造中使用得越来越多。除了汽车领域广泛采用激光焊外,航空航天、造船、医学等领域也越来越多地引入激光焊技术。可大幅度提高生产效率和产品质量并降低成本。

风力发电机组某零部件结构为法兰盘和管子连接而成,法兰盘套装在管子上端外侧,形成端环缝形式,法兰盘与管子焊接在一起后组成一传动部件。上海交通大学对此部件两侧法兰盘与管子的端环缝采用高功率激光深熔焊技术进行了连接(光源为高功率 CO_2 激光器),如图4-1-27所示。

图4-1-27中上端为 CO_2 激光焊接头,工件固定在旋转台上,采用定位棒对上下两个法兰盘进行精确定位,以防止彼此偏转。法兰盘厚度为20mm, CO_2 激光功率7kW,焊接速度0.9m/min,离焦量-2mm,侧吹气体为纯He(其流量为25L/min),焊接后熔深为6~7mm。图4-1-28是焊接完成的部件外观及其焊缝横截面宏观照片。

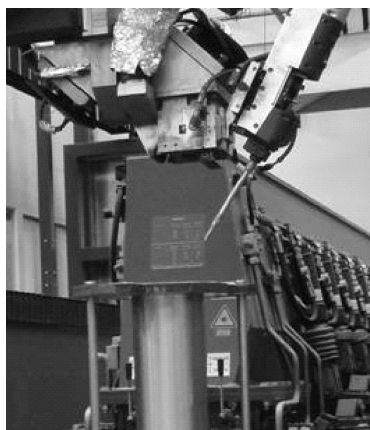


图4-1-27 法兰盘-管子
部件激光深熔焊

1.6.2 铝合金激光填丝焊

激光独有的优点使其在焊接领域得到了广泛的应用,但也有其局限性,其中铝合金的激光焊比较困难,主要难点有:一是铝合金表面反射问题,研究表明,铝表面在室温时对 CO_2 激光的初始反射率在95%以上,远远高于钢等黑色金属;二是铝合金和钢相比,电离能低,又含有大量的Mg、Zn、Li等低沸点元素,因此铝激光焊时,合金元素的蒸发和等离子体的产生都比钢更为剧烈,对焊缝成形影响很大;三是铝合金激光焊在焊透的情况下焊接过程稳定性差,表面成形不好,焊缝



图 4-1-28 CO₂ 激光焊接法兰盘-管子焊接完成的部件外观及其焊缝横截面宏观照片

易出现下塌和孔洞等缺陷；四是对于铝合金而言，在焊接形成的熔池中，Al-Si 共晶合金的存在，使得在熔池凝固的过程中容易产生热裂纹。

上海交通大学激光制造实验室选用了 ER4043 焊丝对厚度为 1.8mm 的 6061-T6 铝合金进行了激光填丝焊。在采用填充焊丝的情况下，激光焊接铝合金的稳定性大大提高，填充 ER4043 焊丝时的热裂纹敏感性非常低，且在焊接速度为 6m/min 的情况下仍能得到较好的焊接接头。在合适的焊接参数及填丝量条件下，激光填丝焊得到的焊缝余高适中，母材向焊缝过渡平稳，无明显的咬边缺陷，典型焊接接头的表面及截面形貌如图 4-1-29 所示。

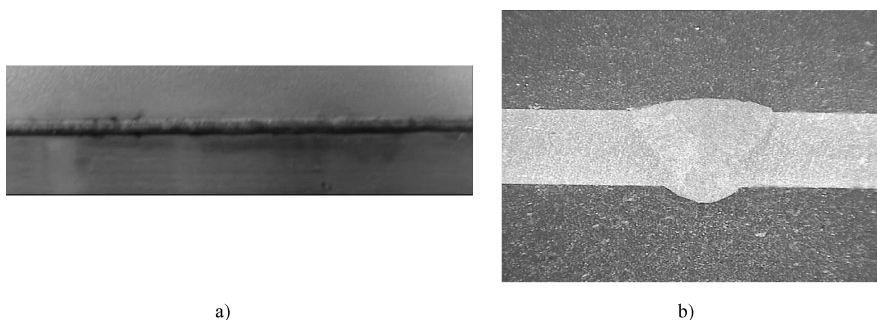


图 4-1-29 激光填丝焊典型焊接接头的表面及截面形貌

通过工艺试验，确定了焊接参数范围，并给出了特定激光功率下焊接速度与送丝速度的匹配关系。当激光功率为 6kW 时，焊接速度与送丝速度的匹配关系如图 4-1-30 所示，可知，随着焊接速度增加，与之匹配的送丝速度范围逐渐变窄。

焊缝组织主要是柱状晶、等轴晶，图 4-1-31 所示为填充 ER4043 焊丝的激光填丝焊的焊接接头显微组织，其中图 4-1-31a 为焊缝中心、图 4-1-31b 为接头熔合线处，可见在熔合线附近，为典型的柱状晶，垂直于熔合线生长，焊缝中心组织为树枝状形态的 Al-Si 共晶组织，且焊缝组织比母材组织晶粒细小得多，致密度高，还存在着大量的等轴晶，大小也比较均匀。焊缝的显微硬度为 60 ~ 80HV，采用 ER4043 焊丝的焊接接头抗拉强度可达 240 ~ 262MPa，抗弯性能良好。

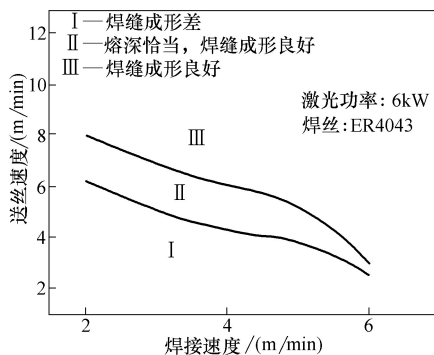


图 4-1-30 用 ER4043 焊丝的激光填丝焊焊接速度与送丝速度的匹配关系

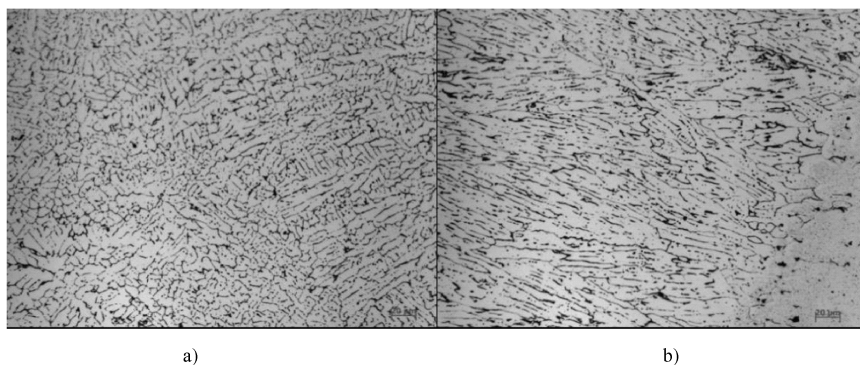


图 4-1-31 激光填丝焊的焊接接头显微组织 (焊丝: ER4043)

a) 焊缝中心 b) 熔合线区

1.6.3 船用钢板 T 形接头激光-电弧复合焊

目前国内激光-MIG 复合焊技术的应用程度较低, 相关的研究及报道较少, 而国外已实现船用钢板 T 形接头激光-电弧复合焊。上海交通大学激光制造实验室利用引进的高功率 CO_2 激光焊接设备采用激光-MIG 电弧复合焊工艺实现了 T 形接头的双面焊接成形。

T 形接头采用了厚 14mm 的船用钢, 焊缝为熔透型焊缝。激光-MIG 复合焊实验装置如图 4-1-32 所示: MIG 焊枪与底板夹角为 45° , 激光与底部面板夹角为 $7^\circ \sim 10^\circ$, 激光光束与 MIG 电弧采用旁轴复合。具体的焊接参数为: 开 I 形坡口, 激光距离腹板的距离为 1mm 左右, 双面焊接的激光功率分别为 9kW 和 12kW, 焊接速度为 $1.0 \sim 1.2\text{m/min}$; MIG 焊丝伸出长度为 16mm, 送丝速度为 11.5m/min , 光弧间距为 $3 \sim 5\text{mm}$ 。其他焊接参数还包括: 侧吹气体为纯 He, 流量为 30L/min , MIG 焊保护气体为 $\text{He}75\% + \text{Ar}25\%$ (体积分数), 流量为 30L/min 。所获得的焊缝成形美观, 表面平整、均匀, 且基本无明显飞溅。

焊接接头的横截面宏观形貌如图 4-1-33 所示, 可见, T 形接头双面焊缝末端叠在一起, 没有出现未焊透, 角焊缝外形呈现凹形, 有利于减小应力集中, 提高疲劳强度。相比一般的电弧焊接, 其变形量很小。对焊缝质量检测表明, 焊缝无裂纹、气孔和夹渣等焊接缺陷。



图 4-1-32 激光-MIG 复合焊实验装置

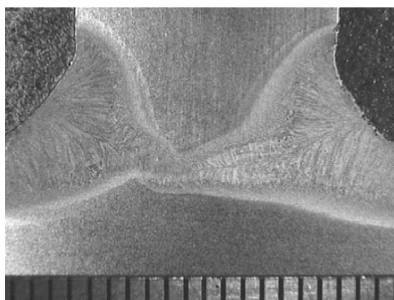


图 4-1-33 T 形接头双面焊焊接接头的横截面宏观形貌

1.6.4 双光束激光焊技术的应用

1. 双光束激光焊接镀锌板

镀锌钢因其良好的耐蚀性而被广泛应用于各个领域, 而镀锌层的存在使得镀锌钢的焊接工艺性大为降低。这是由于在镀锌钢的焊接过程中, 镀层锌和基体钢的热物理特性的极大差异 (镀锌层

锌的熔点是 420°C ，沸点是 908°C ，基体钢的熔点是 1300°C ，沸点是 2861°C ），镀层锌的汽化先于基体钢的熔化，因此采用熔焊方法，通常会产生大量的锌蒸气，造成焊接过程的不稳定性，在焊缝中存在气孔；对于搭接接头，镀锌层的挥发不仅发生在上下表面，同时也出现在上下板结合处，焊接过程有的区域蒸气快速喷出熔池表面，有的区域锌蒸气又难以逸出熔池表面，影响焊缝质量。

双光束激光焊能够解决锌蒸气带来的焊接问题。其焊接过程中一束光作为辅助加工，另一束光实现焊接功能。根据辅助光束的作用机制分为四类：延迟焊接小孔闭合；延迟熔池凝固；预先切割出细缝；预先气化锌层。Salman Iqbal 等人采取了双光束激光焊的方法完成了镀锌板重叠焊缝的焊接。在焊接时，第一束激光先把板材切出一道细缝，一是预先去除部分锌层；二是便于焊接过程中锌蒸气从细缝中排出。然后由第二道激光完成真正所需的焊接。其原理如图 4-1-34 所示。

2. 双光束激光焊接铝合金

铝合金对波长 $10.6\mu\text{m}$ 激光的高反射和自身的高导热性以及焊接过程中容易产生气孔、裂纹、焊接的烧损以及不稳定性等问题，一直是单束激光焊接铝合金的研究难题。双光束激光焊可以增大匙孔尺寸，使得匙孔不易闭合有利于气体排出，同时可以降低冷却速度，减少气孔和焊接裂纹的产生。并且焊接飞溅量小，过程更加稳定，所以双光束焊接铝合金所获得的焊缝表面成形也更加优良。

3. 双光束激光焊接不等厚板

采用单激光束进行不等厚度板材拼焊时，存在一些难以克服的问题，如由于激光斑尺寸很小，并且要同时落在两板边缘处，光斑位置难以控制，这对板边的准直度和平整性有很高要求；有间隙板材对接焊时，所允许的间隙量较小，而焊缝上下表面凹陷与板边间隙直接相关。而双光束激光焊能基本解决这些问题。在不等厚度拼板的焊接中，双光束激光焊的适应性更好，对工件及其装配精度要求较低，尤其在对接接头的焊接中，允许的间隙量更大；在双光束条件下匙孔一直处于开放状态，从而使得等离子体从匙孔中不断稳定地逸出，匙孔内等离子体的压力值始终保持在一个较低的水平，因此，不会出现剧烈的等离子体从匙孔内爆发喷出的现象，双光束产生的小孔更为稳定，使得焊接过程更稳定，从而提高了焊接质量。图 4-1-35 为单、双光束下的焊缝表面比较。在相同焊接参数下（激光功率 1.65kW 、焊接速度 1.4m/min ），单光束焊缝表面较为粗糙、不规则，有明显

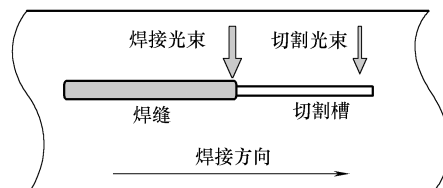


图 4-1-34 双光束激光焊接镀锌钢板的原理

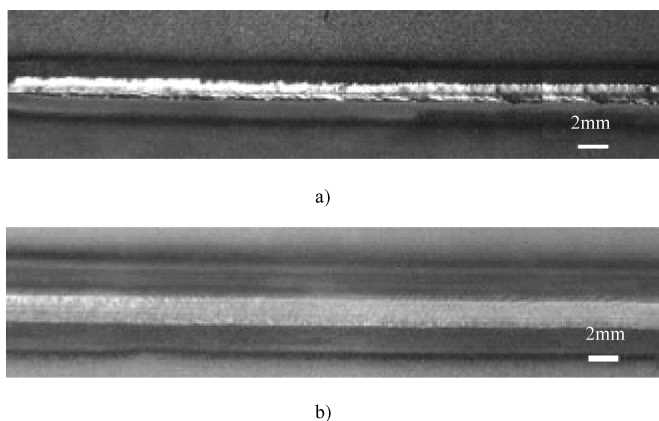


图 4-1-35 不等厚板在激光功率 1.65kW 、焊接速度 1.4m/min 条件下的焊缝表面形貌

a) 单束激光焊接表面状态 b) 并行双光束激光焊接表面状态（能量比为 $1:1.2$ ）

的鱼鳞纹，而光能量比为 1:1.2 的双光束焊缝表面比较光滑、规则，焊缝表面质量明显提高。

4. 双光束激光焊接大厚板

随着激光器输出功率的增加和光束质量的提高，厚板的激光深熔焊得到了快速发展。但是由于大功率激光器价格昂贵，而且大厚板一般还需要填充金属，在实际生产中受到一定的限制。采用双光束激光焊技术不仅可以提高激光功率，而且还可以提高有效光束加热直径，增加熔化填充焊丝的能力，同时能稳定激光孔匙，提高焊接稳定性，提高了焊接质量。

1.6.5 镀锌钢板的激光钎焊

通过优化激光钎焊的焊接参数，分别对镀锌钢板搭接和折边焊接两种方式进行激光钎焊。图 4-1-36所示为搭接接头形貌，试验材料板厚为 1.1mm，激光功率为 2kW，焊接速度为 10mm/s，送丝速度为 20mm/s。可见，焊缝成形较好，对结合区放大后也没有观察到明显的气孔等缺陷。

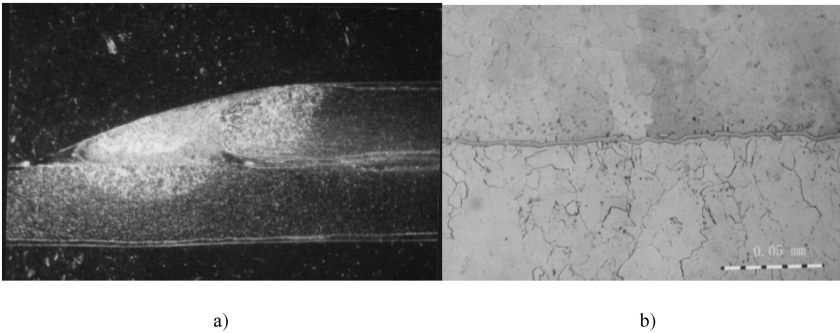


图 4-1-36 激光钎焊镀锌钢板搭接接头形貌

a) 搭接接头金相照片 (10 ×) b) 搭接接头结合区微观照片

图 4-1-37 所示为汽车后盖板激光钎焊试验的宏观照片，试样板厚 0.8mm，激光功率 2kW，焊接速度 40mm/s，送丝速度 40mm/s。图 4-1-37a 为钎焊汽车后盖板外观，图 4-1-37b 为激光钎焊汽车后盖板的焊缝截面图，焊缝平整美观，不存在钎料熔化不均匀等现象，焊接质量达到了工业要求。

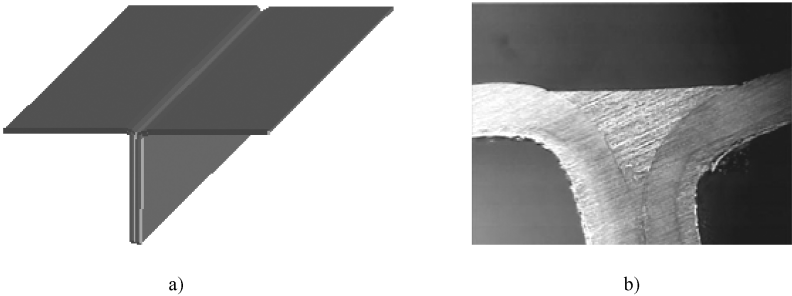


图 4-1-37 激光钎焊汽车后盖板外观及其焊缝截面图

a) 激光钎焊汽车后盖板外观 b) 汽车后盖板焊缝截面图

1.7 激光切割的原理及特点

从 20 世纪 70 年代以来随着 CO₂ 激光器及数控技术的不断完善和发展，目前激光切割已成为工业上板材切割的一种先进加工方法。在 20 世纪 50 ~60 年代，对于中厚板采用氧乙炔火焰切割；对于薄板采用剪床下料，成形复杂零件大批量的采用冲压，单件的采用振动剪。20 世纪 70 年代后，

为了改善和提高火焰切割的切口质量,又推广了氧乙烷精密火焰切割和等离子切割。为了减少大型冲压模具的制造周期,又发展了数控步冲与电加工技术。各种切割下料方法都有其有缺点,在工业生产有一定的适用范围。与传统的板材加工方法相比,激光切割具有切割材料范围广、高的切割质量、高的切割速度、高的柔性(可随意切割任意形状)、热影响小等优点。

1.7.1 激光切割的原理及分类

在当代制造工业中,激光切割技术已广泛应用于金属和非金属材料的加工中,它可大大减少切割加工时间,降低加工成本,提高切割工件质量。激光切割按照激光束的输出时间特性可以分为连续激光切割和脉冲激光切割。连续激光切割是重要的激光切割加工形式,主要用于各种材料的高效切割,而脉冲激光主要应用于材料的精密切割。 CO_2 激光既可用于金属也可用于非金属材料的切割,因此, CO_2 激光切割占有目前最大的激光切割市场。下面以连续激光切割为对象,介绍激光切割的原理和方法分类。

1. 激光切割的原理

激光切割是利用经聚焦的高功率密度激光束照射工件,使被照射的材料迅速熔化、汽化、烧蚀或达到燃点,同时借助与光束同轴的高速气流吹除熔融物质,从而实现将工件割开。激光切割属于热切割方法之一。激光切割的原理如图4-1-38所示。

2. 激光切割的分类

从切割过程的物理形式上看,激光切割可分为激光汽化切割、激光熔化切割、激光氧气切割和激光划片与控制断裂四类。

(1) 激光汽化切割 利用高能量密度的激光束加热工件,使温度迅速上升,在非常短的时间内达到材料的沸点,材料开始汽化,形成蒸气。这些蒸气的喷出速度很大,在蒸气喷出的同时,在材料上形成切口。材料的汽化热一般很大,所以激光汽化切割时需要很大的功率和功率密度。激光汽化切割多用于极薄金属材料和非金属材料(如纸、布、木材、塑料和橡皮等)的切割。

(2) 激光熔化切割 激光熔化切割时,用激光加热使金属材料熔化,然后通过与光束同轴的喷嘴喷出非氧化性气体(Ar 、 He 、 N_2 等),依靠气体的强大压力使液态金属排出,形成切口。激光熔化切割不需要使金属完全汽化,所需能量只有汽化切割的 $1/10$ 。激光熔化切割主要用于一些不易氧化的材料或活性金属的切割,如不锈钢、钛、铝及其合金等。

(3) 激光氧助熔化切割 激光氧助熔化切割原理类似于氧乙炔切割。它是利用激光将工件加热至其燃点,利用氧或其他活性气体使材料燃烧放热,使切割过程中除激光能量外的另一热源同时产生,两者同时作为切割热源;同轴气流把熔融的氧化物和熔化物从反应区吹出,在金属中形成切口。由于切割过程中的氧化反应产生了大量的热,所以激光氧气切割所需要的能量只是熔化切割的 $1/2$,而切割速度远远大于激光汽化切割和熔化切割。激光氧气切割主要用于碳钢、钛钢以及热处理钢等易氧化的金属材料。

(4) 激光划片与控制断裂 激光划片是利用高能量密度的激光在脆性材料的表面进行扫描,使材料受热蒸发出一条小槽,然后施加一定的压力,脆性材料就会沿小槽处裂开。激光划片用的激光器一般为Q开关激光器和 CO_2 激光器。控制断裂是利用激光刻槽时所产生的陡峭的温度分布,在脆性材料中产生局部热应力,使材料沿小槽断开。

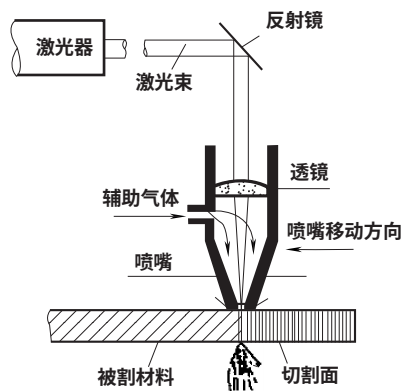


图 4-1-38 激光切割原理示意图

1.7.2 激光切割质量的影响因素

影响激光切割的因素很多,主要包括三个方面:材料特性、激光光束特性以及工艺参数等。这些因素共同作用形成切口,主要以最大切割速度、热影响区大小、切口宽度和表面粗糙度的外在指标来评价切割加工质量。

1. 材料对切割质量的影响

切割材料本身的特性对切割质量起着至关重要的作用,因为它们直接影响材料对光束能量的吸收率,最终决定着激光加工的能量利用率。图 4-1-39 列出了影响激光切割质量的主要材料特性。

2. 激光光束特性对切割质量的影响

(1) 激光光束能量对切割速度与切割质量的影响
激光光束的能量特性对激光切割的影响主要为在其他参数一定的情况下,切割速度随最大切割板厚的增加而减小,随激光功率的增加而增加。

(2) 激光模式及光束质量对切割质量的影响
激光模式决定了聚焦焦点的能量分布,对切割质量影响非常大。一般来讲,激光切割应选用单模或准单模激光,多模激光只能用于热处理或焊接应用。由于单模激光不仅可以聚焦到很小的焦点,使切口很窄,而且单模激光能量分布为中心对称,所以切割不同方向的割缝质量相同。而多模激光的能量分布是不对称的,所以不同方向的切口宽度可能不均一,质量也可能不同。激光光束质量的好坏可以采用光束远场发散角、光束参数积 BPP 和衍射极限因子 M^2 或光束传输因子 K 来表示。对小功率激光器,工作物质均匀稳定,一般可以实现基模输出,其光束横截面能量分布为高斯分布,且在传输过程中保持不变,光束质量较好。而对大功率激光器,一般不易获得基模输出,输出往往为多模激光束,激光光束质量变差。

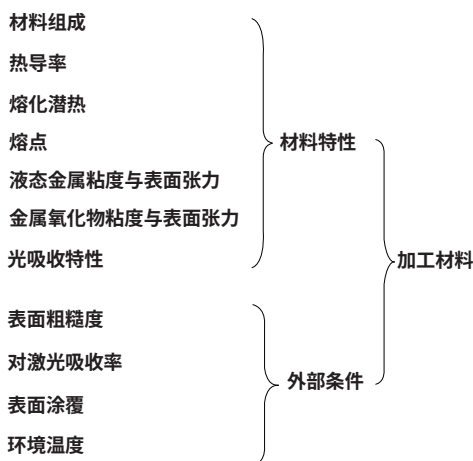


图 4-1-39 材料对切割质量的影响

3. 工艺参数对切割质量的影响

影响激光切割质量的主要工艺参数有喷嘴结构、气流压力、辅助气体、切割速度、焦点位置、焦点大小、景深、穿孔和程序设计等。

(1) 辅助气体及气流压力
由于金属表面的激光反射率高达 95%,使激光能量不能有效地射入金属表面,通过喷吹辅助气体可提高材料对激光的吸收率。辅助气体通常采用氧气、氮气、惰性气体或压缩空气等。采用氧气能够促使金属表面氧化,提高切割的效率;通过增加吹氧压力还可使切口减小,并防止熔化材料再粘结。切割易燃材料时,可采用惰性气体,能有效防止材料燃烧。切割带有金属夹层的易燃材料时,宜采用压缩空气。在一定压力范围内,增加辅助气体的压力,可增大切割厚度,提高切割效率。

在激光切割中采用氧气作为辅助气体时,氧化反应供给切割过程的热量约占激光切割所需能量的 60% 以上,其反应方程式为



若喷嘴为圆形时,流过的气流量为 $L = Kd^2 P_n$,其中, K 为比例常数, d 为喷嘴出口直径, P_n 为喷嘴内腔的滞止压力。

当激光功率和切割速度一定时,氧气压力大,氧气流量大,则氧化反应速度加快,氧化发热量大,使切口变宽,切口条纹深而粗,切割断面粗糙;当氧气压力减小时,氧气流量降低,则氧化速

度减小，切口变窄，切口断面的表面粗糙度会得到改善。当氧气压力降低到某一数值时，切口材料将不完全氧化，切口下表面粘附有较多熔融物，被切割材料甚至不能被切透。

(2) 喷嘴结构 通过喷嘴的设计，可以控制气体压力、工件在气流中的位置，从而影响切口的质量。喷嘴设计的总体要求就是使作用在工件表面的气流压力（切割压力）最大。

(3) 切割速度 当激光功率和辅助气体压力一定时，切割速度与切口宽度保持一种非线性反比关系。当切割速度升高时，则切口宽度减小；若切割速度降低时，切口宽度将会增大。切割速度与切口表面粗糙度呈现一种抛物线关系，随着切割速度低的降低，表面粗糙度迅速增加；随着切割速度的增加，表面粗糙度得到改善，当切割速度超过某一最佳值后随切割速度增大，表面粗糙度改善较为缓慢；当激光切割速度进一步增加到某数值后，将切不透材料。

(4) 焦点位置 聚焦光束的发散角一般都很大，光板尺寸在焦点位置变化比较大，这样不同的焦点位置将使作用在材料表面的激光功率密度变化很大，从而对切口的影响就很大。

1.7.3 连续激光切割的特性及应用

1. 连续激光切割特点

与传统的板材加工方法相比，激光切割具有以下特点：

(1) 高的切割质量 其主要技术参数如下：

1) 切口宽度窄，一般为 0.1 ~ 1.0mm。

2) 热影响区小，其深度为 0.1mm 数量级。

3) 切口光洁。断面平面度平均高度仅为数十微米。切口上、下保留锐边，基本无圆角，也无机械下料常有的毛边。

(2) 高的切割速度 1200W 的 CO₂ 激光切割 2mm 厚低碳钢板的切割速度达到 0.1m/s，切割 5mm 厚有机玻璃的切割速度 0.2mm/s；激光切割钢板生产率达到冲模下料的 30% 左右。

(3) 高的柔性 激光切割机均配有多坐标运动数控系统，根据给定的程序可以切割任意形状、尺寸的板材。切割过程容易自动控制，具有发展为自适应控制切割系统的良好前景。

(4) 高的材料适应性 几乎可以切割任何金属和非金属材料，包括各种硬的、软的、脆性的、塑性的等不同力学性能的材料。激光切割是一个热作用过程，加工难易与材料的力学性能无直接联系，而主要决定于材料的热物理性能，只是在切割铜、铝等高反射率、高导热性材料时有些困难。但适当地控制激光参数，仍可得到满意的切割结果。激光切割的板材厚度一般在 10mm 以下。提高激光功率，可加大切割厚度，但切口质量特别是切口底部的质量恶化，没有很大实用意义。

2. 连续激光切割应用实例：汽车用冷轧钢板的激光切割

宝山钢铁股份有限公司采用 CO₂ 激光对汽车钢板的激光切割进行了应用研究。

(1) 试验设备和材料 其试验设备采用波长为 10.6μm、功率为 4kW 的快速轴流 CO₂ 激光器，光束聚焦使用 125mm 的透镜。激光光束的输出经过 9 个反射镜和 1 个透镜。用直径为 1.5mm 的圆锥形喷嘴，气体喷嘴与工件的距离控制在 0.8mm 左右。试验材料为汽车厂广泛采用的低碳冷轧 St14 钢板，试样厚度为 1.0mm 和 2.0mm。其化学成分和力学性能见表 4-1-3 和表 4-1-4。

表 4-1-3 St14 钢的化学成分 (质量分数, %)

C	Si	Mn	P	S	Ti	Al	N
0.02	0.02	0.25	0.015	0.005	0.001	0.039	0.003

表 4-1-4 St14 钢的力学性能

屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A (%)	塑性应变比 r	应变硬化指数 n
147.2	307.50	43.46	1.78	0.24

在激光切割工艺试验中,辅助工艺气体为 N_2 , 压力为 1.5MPa。

(2) 切割质量及试验参数 切割质量可根据切口的状态来评估。切割质量可分为三种:第1种,切口不平直,内切口和外切口严重不平整,且有大量余渣;第2种,切口较平直,但内切口和外切口不平整,且内切口有余渣;第3种为切口平直,内切口和外切口平整,无余渣。第3种为可接受的切口质量。下面对两种厚度的 St14 钢板用不同的激光切割工艺参数进行切割,寻找出符合第3种特征的参数范围。

研究表明:当钢板和其他条件不变时,激光功率与切割速度有一个合适匹配比。当激光功率一定时,切割速度过慢和过快,都不能得到符合第3种质量的切口。当材料厚度为 1.0mm 时,激光功率为 3kW,切割速度为 6m/min 时,得到第3种质量的切口;当材料厚度为 2.0mm 时,激光功率为 3.5kW,切割速度为 4.8m/min 时,同样能得到第3种质量的切口。同时对激光切割的热影响区大小和切割粗糙度进行分析,可发现符合第三种质量切口特征的试样热影响区宽度为 45 ~ 65 μm ;用适当工艺参数时,切割后钢板表面很平整,无毛刺。

1.7.4 脉冲激光切割的特性及应用

1. 脉冲激光切割特性

脉冲激光切割可获得宽度窄而且均一的切口、垂直而光洁的切割面,但切割速度大大低于连续激光切割,主要用于精细、高精度零件的切割加工和打孔。

脉冲激光切割的主要工艺参数是激光平均输出功率、脉冲峰值功率、脉冲频率和脉冲持续时间(脉冲宽度)、切割速度、焦点位置和辅助气体。这些工艺参数对切割质量的影响表现如下:

(1) 激光平均输出功率 P_a 脉冲切割低碳钢时,随着 P_a 的增大,切口宽度也增大。因此,选择 P_a 要恰当, P_a 选得过大,切口宽度会太大,影响切割质量。

(2) 脉冲峰值功率 P_p P_p 对切割面的表面粗糙度和热影响区的宽度有明显的影响。随着 P_p 的增大,切割面粗糙度降低,但当 P_p 大于某一临界值后,表面粗糙度不再降低,并且切割面的表面粗糙度沿板厚方向也有所不同,切割面上部表面粗糙度较小而下部较粗糙,两者相差约 $Ra10\mu\text{m}$ 。钢板越薄,切割面表面粗糙度越小,切割面上、下部的差异也越小,如厚 1.2mm 钢板的平均表面粗糙度均在 $Ra10\mu\text{m}$ 以下。

(3) 脉冲频率 脉冲频率影响切割面的表面粗糙度和热影响区宽度。脉冲频率的增大会使切割面的表面粗糙度降低,但频率高于一定值后,表面粗糙度反而增大;同时,随着脉冲频率的增大,切口上部热影响区宽度和中央处热影响区宽度变化不大,而下部热影响区宽度则明显增大,因此,从减小热影响区宽度而言,脉冲频率宜低一些,尤其在切割带尖角的零件时。

(4) 切割速度 与连续激光切割一样,脉冲激光切割时,如切割速度过慢,切口宽度会增大;切割速度过快,切口则不整齐,切割面表面粗糙度增大。

(5) 焦点位置 当离焦量为 0 时,上部切口宽度和下部宽度都达到最小值。

脉冲激光切割时,在正确选择切割参数的条件下,可以获得很窄的切口宽度和光滑的切割面,且尺寸精度能控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内,特别适合于细微加工。

2. 脉冲激光切割应用

由于脉冲激光切割可获得宽度窄而且均一的切口、垂直而光洁的切割面,但其主要用于精细、高精度零件的切割加工,特别是在一些半导体、电子器件以及医疗器械行业中使用广泛,下面简单介绍其在医疗器械制造中的应用。

在冠心病的治疗方面,已经从药物治疗、外科手术治疗发展到了介入式治疗。在介入式治疗中使用最多的冠状动脉支架大多是采用激光精细切割制备而成的,图 4-1-40 和 4-1-41 所示分别为手工编制的支架和激光切割的支架。



图 4-1-40 手工编制的支架

冠状动脉支架一般采用的材料是 316L 不锈钢，合金成分为 022Cr17Ni12Mo2N，管材直径为 1.6mm，壁厚为 0.1mm，采用 Nd:YAG 激光器进行切割，首先利用二维 CAD 软件进行结构设计，然后生成与切割机接口兼容的文件，最后用切割机软件完成激光切割轨迹的编程，进行切割即可，切割过程示意图如图 4-1-42 所示。

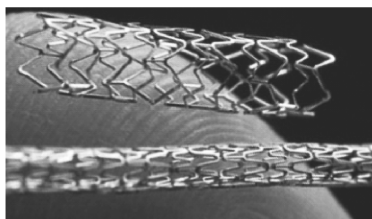


图 4-1-41 激光切割的支架

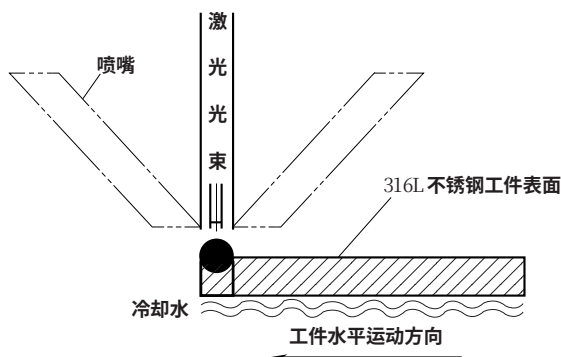


图 4-1-42 冠脉支架切割过程示意图

激光切割辅助气体氧气与激光束同轴由喷嘴喷出，保护透镜免受污染并吹走激光切割区域底部熔渣，使切割过程顺利持续进行，同时有利于提高工件对激光的吸收率。氧气与奥氏体不锈钢在高温下发生铁氧反应，提供了大量热量，使切割进程加速，从而提高切割能力和质量。氧气压力为 0.2~0.4MPa，速度较高，与切口材料进行充分放热反应，并有足够的动量将熔融材料喷射带走。喷射气流压力过低，吹不走切口处熔融材料；压力过高，容易在工件表面形成涡流，削弱了气流去除熔融材料的能力。氧气流速越高，燃烧化学反应和去除熔渣的速度也越快。但氧气流速不是越快越好，流速过快导致切缝出口处金属氧化物的快速冷却，对切割质量不利。喷嘴气流需与切缝处耦合。喷嘴离工件太近，产生对透镜强烈返回压力，影响对 316L 不锈钢切割喷射质点的驱散能力；喷嘴离工件太远，产生不必要的动能。

参考文献

- [1] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理 [M]. 4 版, 北京, 国防工业出版社, 2000.
- [2] 徐紫阳, 王新兵. 高功率连续 CO₂ 激光器 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [3] 李力钧, 现代激光加工及其设备 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [4] 石顺祥, 张海兴, 刘劲松, 等. 物理光学与应用光学 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- [5] 黄英奇, 程兆谷, 赵全忠, 等. 自适应变形镜激光应用技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40 (1): 46.
- [6] 闫毓禾, 钟敏霖. 高功率激光加工及其应用 [M]. 天津, 天津科学技术出版社, 1994.
- [7] 陈继民, 徐向阳, 肖荣诗. 激光现代制造技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [8] Chen Y. B, Lei ZL, Li Liqun. Welding characteristics in different laser-TIG hybrid manner [J]. China Weld-

- ing, 2004, 13 (1): 36-40.
- [9] 陈彦宾, 李俐群, 陈凤东. 激光维持燃烧波对激光-TIG 复合热源的影响 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35 (6): 605-606.
- [10] 雷正龙, 陈彦宾, 李俐群, 等. CO₂ 激光-MIG 复合焊接射流过渡的熔滴特性 [J]. 应用激光, 2004, 24 (6): 361-364.
- [11] 胡连海, 黄坚, 庄凯, 等. 激光与电弧间距对激光复合焊熔滴过渡的影响 [J]. 焊接学报, 2010, 31 (2): 49-52.
- [12] M. Geiger, M. Merklein, A. Otto, A. Blankl. Dual beam NdYAG laser welding Influence of lubricants to lap joint welding of steel sheets [C]. XVI International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers. Proceedings of SPIE, 2007, 6346.
- [13] A. Punkari, D. C. Weckman, H. W. Kerr. Effects of magnesium content on dual beam Nd: YAG laser welding of Al-Mg alloys [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2003, 8 (4): 269.
- [14] M. G. Deutsch, A. P., D. C. Weckman, H. W. Kerr. Weldability of 1.6mm thick aluminium alloy 5182 sheet by single and dual beam Nd: YAG laser welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2003, 8 (4): 246.
- [15] Weichiat Chen, Pal Molian. Dual-beam laser welding of ultra-thin AA5052-H19 aluminum [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39: 889.
- [16] S. Iqbal, M. M. S. Gualini, F. Grassi. Laser welding of zinc-coated steel with tandem beams: analysis and comparison [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184 (1-3): 12-18.
- [17] C. Glumann, J. Rapp, F. Dausinger etc. Welding with combination of two CO₂ lasers -advantages in processing and quality [C]. ICALEO'93, Proceedings of the SPIE Vol. 230: 672-681.
- [18] Heinrich Hackl. MIG-brazing of galvanized thin sheets and profiles [J]. Schweissen und Schneiden, 1998, 50 (6): 102-104.
- [19] Belkacem Bouaifi. Low-heat process enhances joining of coated sheet metals [J]. Welding Journal, 2003, 82 (1): 26-30.
- [20] 封小松, 陈彦宾, 李俐群, 等. 镀锌板激光填丝钎焊 [J]. 应用激光, 2004, 24 (6): 357-360.
- [21] Feng Xiaosong, Li Liqun, Chen Yanbin, et al. Laser brazing with filler wire for galvanized steel sheets [J]. China Welding, 2005, 14 (1): 9-14.
- [22] Hanebuth H, Hoffmann P, Geiger M. Laser beam brazing using the twin spot technology [C]. Laser Materials Processing: Industrial and Microelectronics Applications (September 7, 1994); Proc. SPIE Vol. 2207: 146-153.
- [23] Salman Iqbal, Muddassir M. S. Gualini, Ateeq ur Rehman. Dual beam method for laser welding of galvanized steel [J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42 (1): 93-98.
- [24] 李俐群, 张新戈, 戴景民, 等. 不等厚板双光束激光焊接研究 [J]. 应用激光, 2010, 30 (6): 474-478.

第2章 电子束焊

电子束焊 (Electron Beam Welding, EBW), 由于能量密度高, 热输入低, 加热集中, 通常在真空中进行焊接, 适用于高熔点金属和热敏感金属以及化学活性强的金属的焊接; 由于电子束的功率、焦点位置和扫描轨迹精确可控, 焊缝深宽比大, 焊接变形小, 特别适用于航空、航天、核电工业中精密结构件的焊接; 进入 20 世纪 70 年代后, 随着电子、计算机技术的发展, 以及电子束焊机的制造成本相对下降和电子束焊技术日趋成熟, 电子束焊显现出较高的生产效率和显著的经济效益, 电子束焊开始广泛应用于传感器、仪器仪表、雷达、汽车零部件成批生产制造等。本章重点介绍电子束焊工艺、各种材料电子束焊以及电子束焊工程应用案例。

2.1 电子束焊与深熔效应

2.1.1 电子束焊工作原理

阴极所产生的电子 (热发射或场致发射从电子枪阴极逸出的电子) 在阴-阳极间的高压 (25 ~ 300kV) 电场作用下, 被加速至 0.3 ~ 0.7 倍光速, 经电子枪中静电透镜和电磁透镜的汇聚作用, 形成能量密度极高的电子束流。高速运动的电子撞击到工件表面时, 将其动能传递给工件转化为热能, 使得焊接区迅速熔化-凝固而实现连接。利用电子束焊的“小孔效应”能够一次性穿透数百毫米厚的材料。所谓“小孔效应”是指在高能密度电子束作用下, 金属被迅速加热、熔化和蒸发, 金属蒸气对液态金属产生一个附加压力, 将已熔化的金属向四周排开, 电子束得以连续轰击熔池底部的固体金属, 瞬间在被焊金属中形成小孔。小孔的周围被液态金属包围, 随着电子束在焊接方向上移动, 在熔池前方不断形成新小孔, 液态金属则沿着小孔侧壁向熔池后部流动填满小孔, 然后冷却凝固形成焊缝。

2.1.2 电子束焊工艺特点

1. 能量密度高

电子束焊能量密度高达 $10^7 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$, 可以实现高速、深穿透焊接 (钢可焊厚度达 150mm, 铝合金可焊厚度达 300mm, 焊缝深宽比 $\geq 50:1$)。由于能量密度高, 电子束焊几乎可以用于各种黑色金属、难熔金属、陶瓷等非金属以及复合材料的焊接。

2. 真空保护

电子束焊通常在真空中进行。真空保护不仅可以防止金属高温氧化及空气中有害气体侵入; 而且有利于液体金属中所溶解的气体排出, 降低焊缝金属的含氧量; 特别适宜于活性金属、有色金属材料的焊接。借助于真空环境, 电子束焊常被用于真空密封元件的焊接, 使焊后元件内部保持真空状态。

3. 束流可控

电子具有最小的质量 (其静止质量为 $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$) 和很高的荷质比 ($1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$), 借助于附加电磁场, 可以精确控制电子束的形状和运动轨迹。电子束的功率、焦点位置和电子束的扫描方式、扫描轨迹都可以通过计算机编程精确控制, 使得电子束能够用于精细结构、特殊形状或空间曲线接缝的自动化焊接。通过电子束分束控制, 串列扫描实现热敏感材料预热、焊接、回火一次

完成；并列扫描实现多熔池对称焊接有利于防止变形；电子束束流可控性使得电子束焊机能够实现焊接、钎焊、热处理、表面改性等多种功能。

4. 焊缝可达性好

电子束在真空中可以无衰减长距离传送，因而可以对狭窄空间难以接近部位的接缝进行焊接。

2.1.3 深熔效应

电子束焊时，在 高能密度的电子束作用下，焊接熔池的形成时间极短，并产生明显的小孔效应，使电子束能够在瞬间穿透几厘米至几十厘米厚的金属，实现深熔焊接。

1. 电子束焊能量传输

试验证明，在常规的加速电压下，电子在金属中的穿透深度只有几十分之一毫米。如在 100kV 的加速电压下，电子在铁中仅能穿透约 0.025mm，150kV 的加速电压下，在脱氧钢中的电子穿透深度或电子射程仅为 0.66mm。由于液态金属的密度与固体相差不多，电子穿入固体或液体材料表层的深度可忽略不计，所以电子束焊时，金属加热并不是通过工件表面的热传导作用，而是直接作用于工件内部。

当电子束焊所选用的焦点功率密度低于 10^5 W/cm^2 时，由于工件表面不产生显著的蒸发现象，电子束的能量在工件较浅的表面转化为热能，此时电子束所能熔化的金属深度很小，与其他熔焊方法相似，金属的加热以热传导的方式实现，称为热传导焊接。电子束当焦点的功率密度达到一定值（大于 10^5 W/cm^2 ）时，束斑下局部金属发生强烈地蒸发，形成金属蒸气流，蒸气压力将液体金属排开，熔池下凹形成空腔，电子束得以穿透蒸气而达到熔池的底部，继续轰击熔池底部金属，而形成穿透型小孔。随着电子束向前移动，被蒸气流排斥液体金属流向小孔的后方，凝固形成焊缝，称为深穿入式焊接或小孔焊接。

根据以上的设想，电子束深熔焊过程可解释为：在电子束作用下，金属发生局部熔化和蒸发，并形成金属蒸气孔，电子束（或焊件）向前移动时，电子束作用区同时发生三种效应：

1) 熔孔前沿金属在电子束作用下发生熔化、蒸发。

2) 熔化金属被金属蒸气流排开，围绕蒸气流沿侧壁向熔孔后部流动。

3) 电子束向前移动时，熔孔周围的液体金属也不断向后流动，填充前进中的蒸气孔的后沿，形成连续的焊缝。

斯瓦耳兹认为，尽管电子的质量很小，但在 100kV 电压时，电子速度约为 $1.6 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，约为光速的一半；高速运动的电子撞击到材料表面被阻止，其动能转变为材料的内能。根据经典碰撞理论，高速运动的电子碰撞金属表面时，将其动能传递给晶格的电子和部分转移至晶格原子。电子束能量密度越高，动能越大，晶格振动的振幅越大，金属的内能越大，其温度越高。由于温度升高而使材料熔化或蒸发；在气体或液体状态下，尽管不存在晶格，电子束仍然可以通过撞击方式，进行能量转移；连续不断地蒸发在金属材料中形成一个细小的空腔；如果电子束输入的能量足够大，两个工件的接合面的金属被完全熔化，小孔穿透工件；当电子束和工件之间发生相对移动时，熔化金属在各种力的作用下向电子束冲击形成的空腔的后方流动；随着温度降低，在小孔后部凝固形成焊缝。深熔透焊焊缝的形成过程如图 4-2-1 所示。材料在电子束连续作用下发生熔化、蒸发，形成低密度的蒸气；电子束不断挖掘，形成小孔；在电子束移开后，部分被蒸发的金属随着温度降低返回熔池与熔池金属凝固在一起。

2. 准稳态小孔作用力模型

根据斯瓦耳兹的设想，呈高斯密度分布的电子束轰击工件表面，若能量密度足够高，在作用面的中心可以产生很高的蒸气压力。例如，加热温度达 2100K 时，饱和蒸气压力约为 $3 \times 10^2 \text{ Pa}$ 。深熔透效应是一个物理过程，在这一过程中，电子束能够穿入材料，穿入的深度远远大于电子的射程，

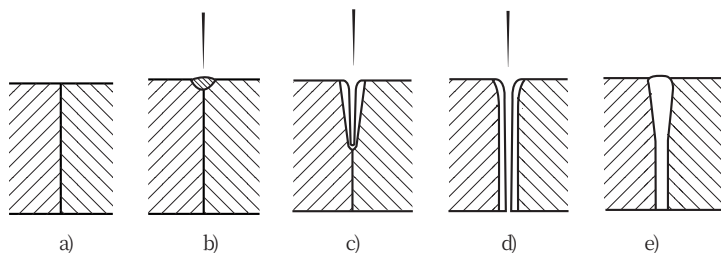


图 4-2-1 深熔透焊缝的形成过程

a) 对接接缝 b) 在表面形成熔池 c) 蒸气压力下形成空腔 d) 形成穿透型小孔 e) 凝固形成焊缝

由于电子束作用,材料发生熔化和汽化,在材料上形成一个熔孔。要使小孔持续保持,就必须使作用于小孔上的各个力(蒸气压力、熔池液态金属静压力、表面张力等)之间保持一种平衡。为了简化作用于小孔上的力,模型中只考虑对焊缝成形影响最大的几个力:电子束压力 p_b 和蒸气流的反冲力 p_r ,它们力图压凹液态表面,熔化金属表面张力 p_s 和凹陷底部的流体静压力 p_d 则力图拉平液体表面,如图4-2-2所示。

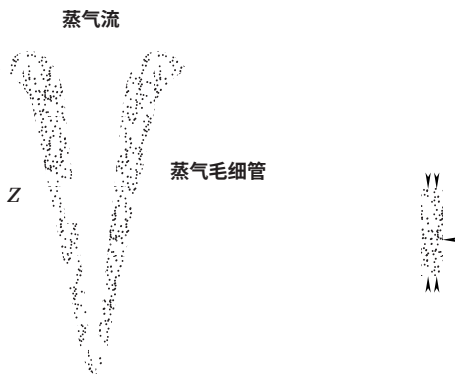


图 4-2-2 小孔上的力的平衡

根据力的平衡条件可得: $p_b + p_r = p_s + p_d$,其中,电子束的压力值很小($< 9.8 \times 10^{-3} \text{ N/m}^2$)可忽略不计,最后推导出力学平衡方程式为

$$p \geq (2\sigma/r) + \rho gh \quad (4-2-1)$$

或

$$h \leq \frac{p}{\rho g} - \frac{2\sigma}{r\rho g}$$

式中 p ——蒸气压力 (N/m^2);

g ——重力加速度 (m/s^2);

σ ——表面张力系数 (N/m)。

在实际电子束焊过程中,要确定各作用力的平衡条件比较困难。此外,一旦电子束沿焊接的方向开始移动时,小孔中的熔化金属还会发生移动,远比上述模型复杂得多。

3. 钉形焊缝形状

典型的电子束深熔焊焊缝形状呈钉形。电子束焊能量来自于电子束流,聚焦电子束的热效应可用高斯分布面热源和圆柱体热源的组合模型表征,如图4-2-3所示。其中面热源控制熔池表面和钉形头部形状,反映熔池开口区域的流体搅拌作用,而体热源控制焊缝深度液体薄层和钉身的形状,反映束流挖掘作用导致的深穿透效应。

电子束深熔焊焊缝形成过程中,除小孔效应对材料纵深的挖掘作用外,小孔四周的薄层熔化液体在 marangoni 效应(表面张力梯度驱动向上和向后的熔体流动)作用下也对熔合区的形成与熔孔形状产生重要贡献,marangoni 效应的搅拌作用使小孔开口处的熔化金属凝固延缓,形成拖尾的椭圆形熔池。诸力的综合作用导致冷却后的焊缝截面呈现长钉形形貌。钉形焊缝表明深度方向上熔合区边界附近存在较大的温度梯度,在形状突变的钉头颈部和钉尖处尤为严重,导致在这两个部位产生数值较大的拉应力,为热影响区微裂纹的形核与扩展以及焊件弯曲变形提供了力学条件。

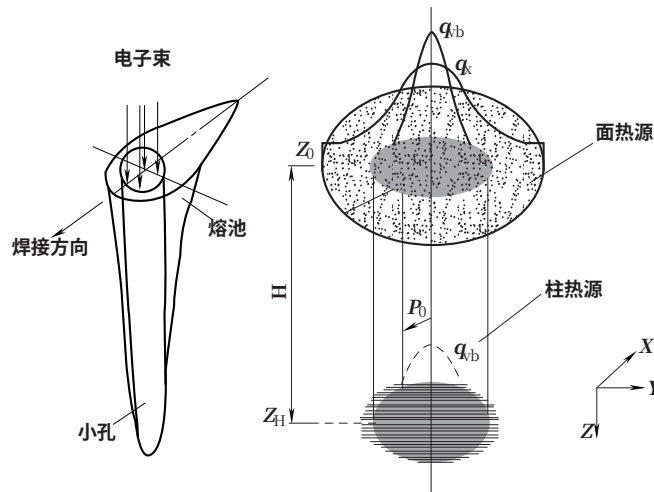


图 4-2-3 电子束焊热源的组合模型

4. 深熔焊的熔池流动行为

假定电子束垂直入射工件，工件与电子束做相对移动时，工件熔化区（熔孔旋转体）的对称性随即发生变化，熔池沿焊接方向的对称截面（工件移动方向与电子束轴线所在平面）如图 4-2-4 所示。在电子束前方（左侧）为熔化区前沿，材料在电子束作用下，加热、熔化，且熔化金属不断地向熔化区流动。在电子束后方（右侧）是凝固的前沿，在此区域熔融状态的金属冷却凝固形成焊缝。随着电子束与工件的相对速度增大，熔化前沿逐渐转移至电子束的下方；而凝固前沿则向后不断拉长。对于中低焊接速度，熔化前沿常常是直接位于电子束流的下方。

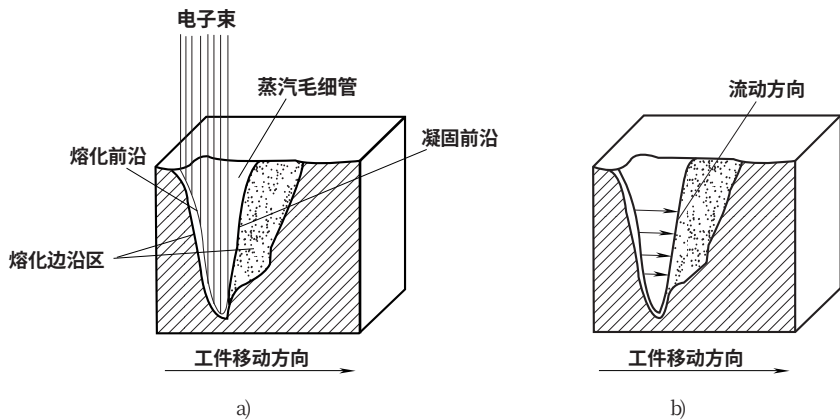


图 4-2-4 纵截面上熔池形状和液体金属的流动行为

a) 熔池形状 b) 液体金属的流动行为

在电子束与凝固前沿之间的熔化边缘区的厚度会随着束径和焊接速度的增加而增加。在熔化区前沿由于电子束的直接作用，温度较高，随着电子束移动，在电子束后方熔化边缘区温度陡降下来，由于温度的不均匀分布将会使蒸气压力与表面张力也随之发生变化。熔化前沿中的熔融金属主要沿着小孔的切线方向，流向电子束后方熔化边缘区域；在液体重力、表面张力、熔池纵向温度梯度引起的液体金属密度变化以及蒸气压力等诸力的联合作用下，在靠近电子束的小孔内区域液体金属流动最强烈，其方向是指向工件的表面；在靠近凝固前沿的区域中，液态金属则向着束流的方向流动。电子束深熔焊时，尽管熔池很小，由于液体金属在两个方向上的对流，对熔池金属进行了强

烈的搅拌。熔池金属流动的行为如图 4-2-4b 所示。

2.2 电子束焊工艺

2.2.1 电子束焊焊接参数及其对焊缝形状的影响

电子束焊的主要焊接参数有加速电压 U_a 、电子束流 I_b 、聚焦电流 I_f 、焊接速度 v_w 及工作距离 h 。电子束焊熔深主要取决于形成空腔的金属蒸发速率，而金属蒸发速率的大小决定于电子束功率密度。电子束功率密度与电子束的功率以及束斑点大小密切相关。

1. 加速电压

电子束焊时，加速电压往往保持不变。在相同的功率、不同的加速电压下，所得到的焊缝深度和形状是不同的。提高加速电压可增加焊缝的熔深，如图 4-2-5a 所示。因为提高加速电压，增加了电子束的功率，此外，由于电子枪的聚焦性能有了改善，进一步提高了电子束斑点的功率密度。电子束功率密度与加速电压的关系如图 4-2-5b 所示。当焊接大厚度工件并要求得到轮廓线平行的窄焊缝，或电子枪与焊件的距离较大时，可提高加速电压。

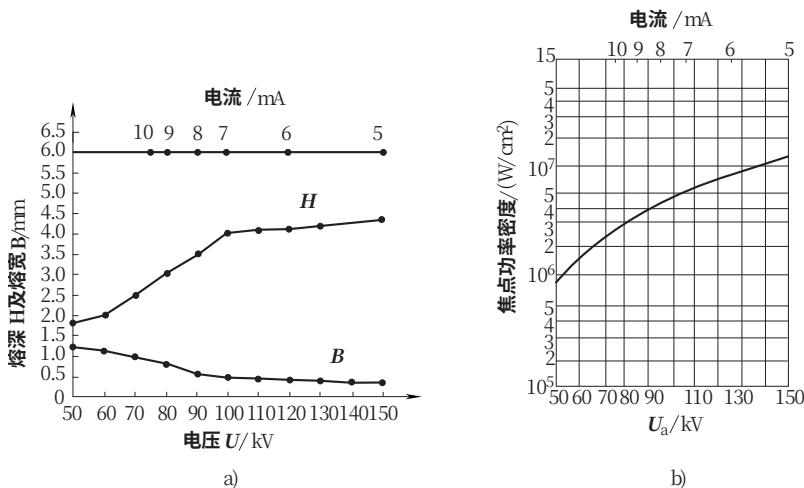


图 4-2-5 加速电压对焊缝形状的影响

a) 加速电压对焊缝形状的影响 b) 加速电压对功率密度的影响 (功率不变)

2. 电子束流

束流与加速电压一起决定着电子束的功率。束流增加，使电子束的功率密度提高，从而增加焊缝熔深。但是束流增加时，由于空间电荷效应和热扰动加剧，可能使电子光学系统的聚焦性能变坏，反而减小熔深；因此提高束流之后，聚焦电流也要做相应的调整。电子束焊时，因为加速电压保持不变，为了满足不同的结构件或工艺的需要，主要调节束流值。热输入对焊缝熔深的影响如图 4-2-6 所示。常采用的调整措施有以下方面：

1) 在环缝焊接时，控制起始束流的递增、收尾束流的递减，以获得均匀的搭接段焊缝的质量。

2) 对于各种不同厚度的材料，选择不同的束流，以得到不同的熔深。

3) 在焊接大厚度件时，由于焊接速度较低，随着焊件温度的增加，束流需逐渐减小。

3. 焊接速度

焊接速度和电子束功率一起决定着焊缝的熔深、焊缝宽度以及焊接熔池行为（冷却、凝固及

焊缝熔合线形状)。在其他焊接参数不变的情况下,增加焊接速度,减少单位时间的输热量,焊缝熔深相应减小。图4-2-7所示为焊接速度对熔深的影响(束功率9kW)。

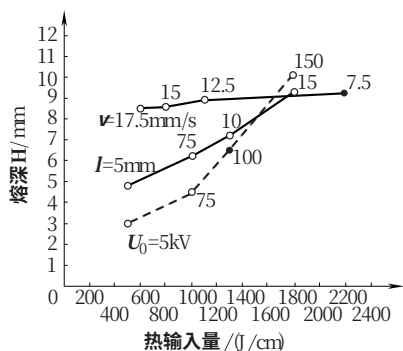


图 4-2-6 输入能量对焊缝熔深的影响

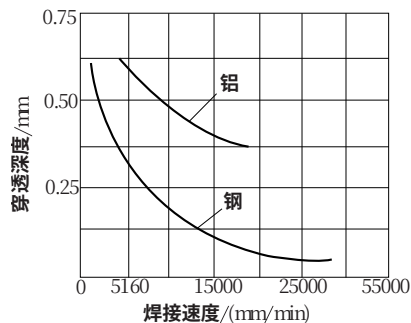


图 4-2-7 焊接速度对熔深的影响

4. 工作距离

工作距离通常指真空室顶部到工件的距离,工作距离变化会影响到电子束的聚焦程度;当工作距离变化之后,为了保持斑点的能量密度,需要相应调节聚焦电流。工作距离对电子束功率密度的影响,如图4-2-8a所示。工作距离增大后,若其他焊接参数不变,聚焦电流要减小,因而束斑点直径增大从而使功率密度降低,焊缝熔深也就相应减小;反之,工作距离减小,则熔深相应增加。工作距离对焊缝熔深的影响,如图4-2-8b所示。工作距离变小时,电子束的压缩比增大,使电子束斑点直径变小,增加了电子束功率密度。通常在不影响电子枪稳定工作的前提下,应采用尽可能短的工作距离,但工作距离太小,会使过多的金属蒸气进入电子枪,造成放电。

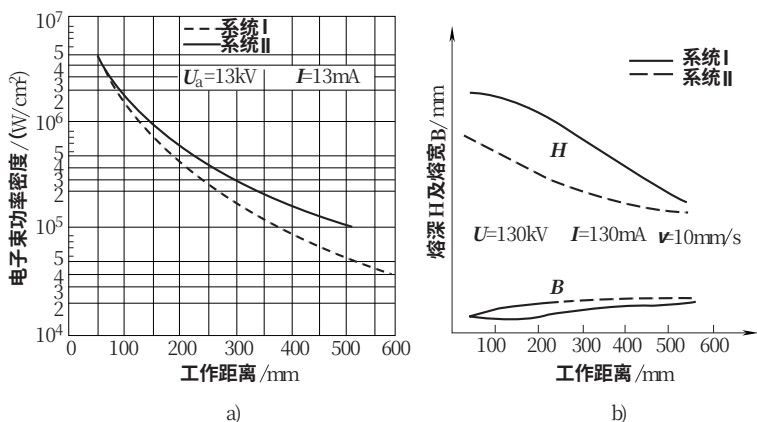


图 4-2-8 工作距离对功率密度和焊缝形状的影响

a) 对功率密度的影响 b) 对焊缝形状的影响

5. 焦点位置

在电子束焦点附近,存在着一段束斑尺寸变化不大、功率密度几乎相等的区域,称为活性区。活性区的大小与电子枪的电子光学系统性能有关。电子束活性区,如图4-2-9a所示。电子束焊时,焦点的位置相对于焊件表面有上聚焦、下聚焦和表面聚焦3种。焦点位置对焊缝形状影响很大。当工件处于活性区的不同范围内进行电子束焊时,焊缝横截面的形状及熔深有明显区别,如图4-2-9b所示。电子束焊时应根据材料、板厚、接头形式、接头间隙、焊接速度等确定焦点位置,当焊件被焊厚度大于10mm时,通常采用下聚焦焊,焦点处于焊件表面以下2~3mm位置(焦点在焊缝熔深的30%处),当焊接厚度大于50mm时,焦点置于焊缝熔深的50%~75%之间更合适。

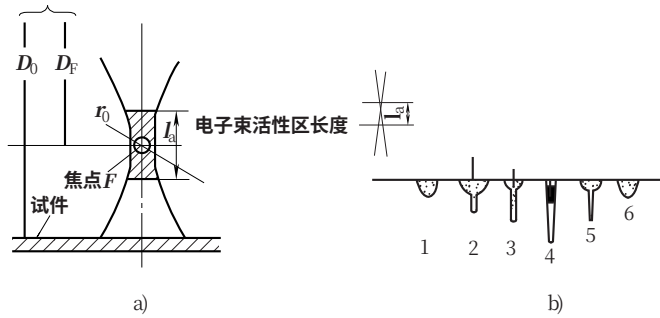


图 4-2-9 电子束活性区和焦点位置与焊缝形状关系示意图

a) 电子束活性区 b) 焦点位置与焊缝形状关系

6. 真空环境

真空室的真空度降低,增加了电子与金属蒸气、气体粒子的碰撞几率;碰撞致使气体粒子电离,电子束能量损失;碰撞又使电子束发生散射,能量密度降低,焊缝穿透深度降低。真空度对焊缝形状的影响如图 4-2-10 所示。

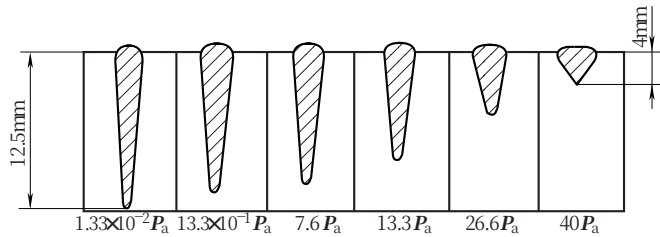


图 4-2-10 真空度对焊缝形状的影响

7. 脉冲电子束

采用脉冲电子束焊,可有效地增加熔深,如图 4-2-11 所示。图 4-2-11a 为直流电子束的特性,图 4-2-11b 为脉冲电子束的特性。比较图 4-2-11a、b 可以发现,由于脉冲电子束的峰值功率远比直流电子束高,其峰值温度也比平均温度高;而金属蒸发率与温度呈指数型关系,温度升高 1 倍,其蒸发率增加 10 倍或更高;采用脉冲电子束焊时,由于峰值温度高,金属蒸发速率成倍增加,金属蒸气的反作用力增大,从而提高了焊缝的深宽比。

2.2.2 电子束焊焊接参数的匹配

电子束焊焊接参数主要有电子束流、加速电压、焊接速度、聚焦电流和工作距离等。一般地说,熔深随加速电压、束流增加而增加,但随束斑直径、工作距离、焊接速度增加而减小。提高加速电压,可增加熔深;增加电子束流,熔深和熔宽都会增加;而增加焊接速度会使焊缝变窄,熔深减小;电子束聚焦状态对熔深及焊缝成形也有很大的影响,焦点变小可使焊缝变窄,熔深增加。

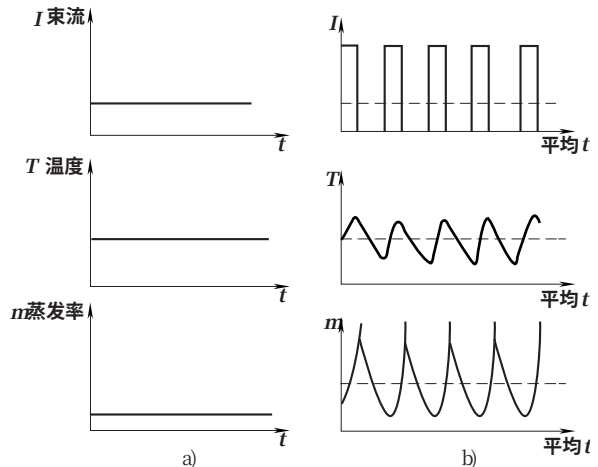


图 4-2-11 脉冲电子束对焊缝形状的影响

a) 直流电子束的特性 b) 脉冲电子束的特性

焊接同一零件,采用不同的电子束焊机,由于电子枪结构、加速电压和真空度的差异,电子束的束流品质也不尽相同,所采用的电子束焊接参数也就不同;即便使用同一台电子束焊设备,焊接同一零件,也可以选用不同的参数组合进行焊接。焊接参数应根据材料、板厚、接头形式、装配间隙、焊缝形状尺寸的技术要求,进行合理选配。钢电子束焊接参数的选择范围如图 4-2-12 所示。

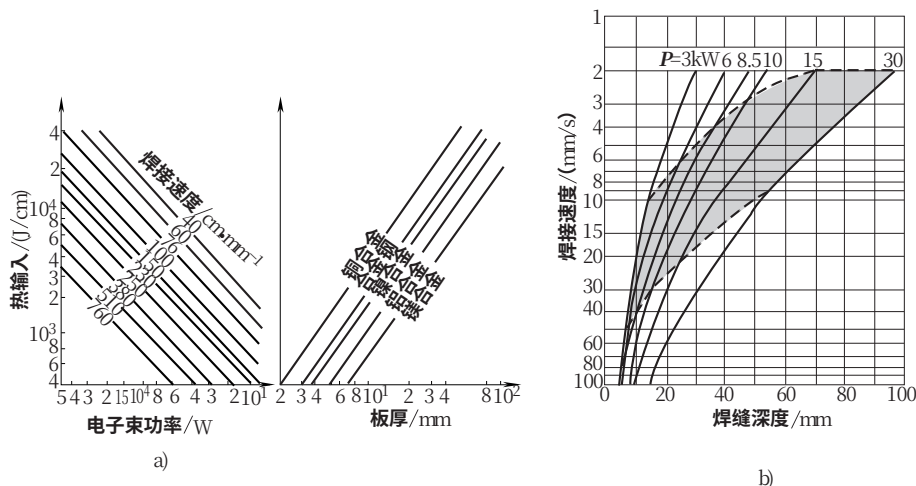


图 4-2-12 钢电子束焊接参数的选择范围

a) 电子束功率、输入热量和焊接速度及板厚的匹配 b) 电子束功率与焊接速度、焊缝深度匹配

2.2.3 电子束焊的特殊工艺规程

1. 接头制备与工件装夹

待焊工件的接口需精密加工,装配时应使工件的接头紧密接触,间隙尽可能地小且均匀;保证装配间隙不应大于 0.13mm,当板厚超过 15mm 时,允许最大间隙 ≤ 0.25 mm,非真空电子束焊时,装配间隙最大至 0.8mm。

装配夹具既要能保持零部件形状尺寸、安装形位精度和最小接头装配间隙,又不能影响电子束的可达性和可操作性。

2. 退磁处理

接头附近的夹具和工作台的零部件应使用非磁性材料来制造,以防磁场对电子束的干扰。工件的剩磁强度应不大于 $(0.5 \sim 4) \times 10^{-4}$ A/m,过大时应进行退磁处理。工件、夹具和工作台应保持良好的电接触,其间不允许垫绝缘材料。

3. 接头的清理

工件表面的氧化物、油污应采用机械或化学方法清除干净。清理后的工件,不允许用手或不清洁的工具接触接头区域。

4. 电子束与接缝对中

电子束与接缝对中是电子束焊的重要环节。通常采用辅助光学系统和 CCD 摄像机监测接缝与电子束斑点的位置偏差,借助于 X—Y 平面驱动机构,调整工件的位置或电子枪的位置,使接缝与电子束对中。

5. 定位焊

为了防止接头间隙在焊接过程中发生变化,常用定位焊缝固定待焊工件。

6. 电子束扫描和偏转

焊接过程中采用电子束扫描可以扩大加热区域，增大熔池宽度，降低熔池冷却速度，降低对接头制备精度的要求；电子束扫描有利于气体逸出；消除熔深不均匀等缺陷；填丝焊接时采用电子束扫描有助于焊丝的熔化和改善焊缝成形。

7. 薄板焊接

薄板（0.03~2.5mm）导热性差，为防止过热，电子束焊时应采用夹具。夹具材料宜选纯铜。对极薄工件应考虑使用脉冲电子束，以控制焊接接头的热输入。

8. 厚板焊接

电子束可以一次焊透 200mm 以上的钢板，焊道的深宽比可以高达 50:1。当被焊钢板厚度在 60mm 以上时，应将电子枪水平放置进行横焊，因为侧向焊接时，液态金属在重力作用下，流向熔孔（电子束）的下方，有利于焊缝成形。

2.2.4 电子束焊的接头设计

电子束焊接头有对接、角接、T 形接、搭接和端接。电子束斑点直径小，能量集中，焊接时一般不添加金属。为了保证焊接结构使用的可靠性，应根据结构的形状、尺寸受力情况、工作条件和电子束焊的特点，合理地选用焊接接头的形式。电子束焊接头设计应注意下列一些因素：

- 1) 满足焊接接头的使用条件，如温度、压力、耐蚀性、振动及疲劳等。
- 2) 保证焊接接头具有足够的强度和刚度，保证有一定的使用寿命。
- 3) 接头形式应符合电子束焊工艺的特点。
- 4) 焊后尽可能不再进行机械加工。
- 5) 尽可能减少结构的焊接应力和变形。
- 6) 焊接接头应便于进行焊后检验，如射线探伤、超声波探伤等。

1. 对接接头

最常用的对接接头形式如图 4-2-13 所示。其中图 4-2-13a、b、c 三种接头的加工简单，但需要装配夹具。不等厚的对接接头采用上表面对齐的设计优于台阶接头，后者在焊接时要用宽而倾斜的电子束，如图 4-2-13d 所示。带锁底的接头如图 4-2-13e、f 所示，便于装配对齐，锁底较小时，焊后可避免留下未焊合的缝隙。图 4-2-13g、h 所示的接头有自动填充金属的作用，焊缝成形得到改善。斜对接接头只用于受结构和其他原因限制的特殊场合，如图 4-2-13i 所示。为了提高接头的强度、延展性、疲劳寿命和避免应力集中，应优先采用全穿透或熔透到指定深度的单道焊接头。

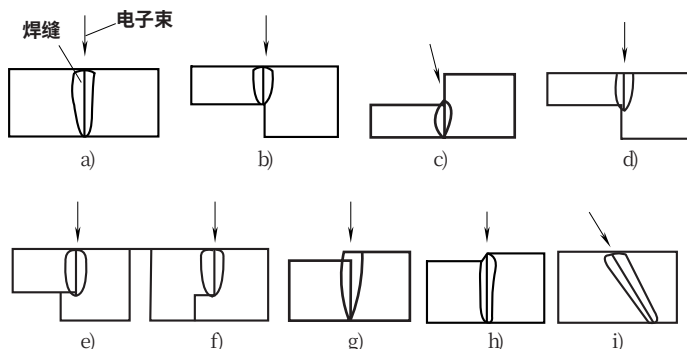


图 4-2-13 最常用的对接接头形式

- a) 对接接头 b) 齐平接头 c) 台阶接头 d) 锁口对接接头 e) 锁底接头
f) 双边锁底接头 g)、h) 自填充材料的接头 i) 斜对接接头

2. 角接接头

常用的角接接头形式如图 4-2-14 所示。其中图 4-2-14a 为垂直穿透的角接头，接头中保留未焊

合的间隙, 承载能力差。图 4-2-14h 为卷边角接, 主要用于薄板, 其中一件需弯边 90° ; 图 4-2-14c、d、e 采用锁底角接, 易于装配对齐, 从外侧施焊; 而图 4-2-14g 为锁底角接, 从内侧施焊。

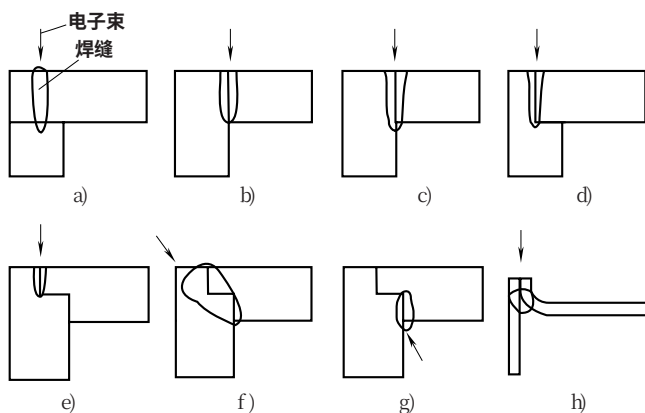


图 4-2-14 电子束焊常用的角接接头形式

- a) 垂直穿透角接接头 b) 正常角接头 c)、d) 锁底自对中接头 e) 双边锁底角接接头
f) 双边锁底斜向施焊接头 g) 双边锁底接头 h) 卷变角接接头

3. T 形接头

T 形接头形式如图 4-2-15 所示。垂直穿透型的接头中有未焊合的缝隙, 接头强度差。推荐采用单面焊 T 形接头, 焊接时焊缝易于收缩, 残余应力较低。其中图 4-2-15c 方案适用于板厚超过 25mm 的结构件。

4. 搭接接头

搭接接头多用于板厚 1.5mm 以下的场合, 如图 4-2-16 所示。搭接接头常采用单面角向焊接, 如果结构条件允许也可进行双面角向焊接; 垂直穿透型搭接接头主要用于板厚小于 0.2mm 的场合, 有时需要采用散焦或电子束扫描以增加熔合区宽度。厚板搭接接头焊接时, 需要添加焊丝以增加焊脚尺寸, 有时也采用散焦电子束施焊以加宽焊缝, 形成光滑的焊趾过渡。

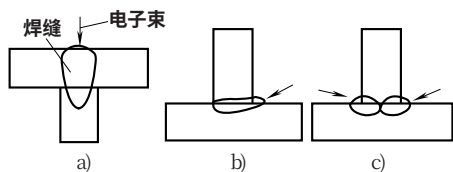


图 4-2-15 电子束焊 T 形接头形式

- a) 熔透焊缝 b) 单面焊 c) 双面焊

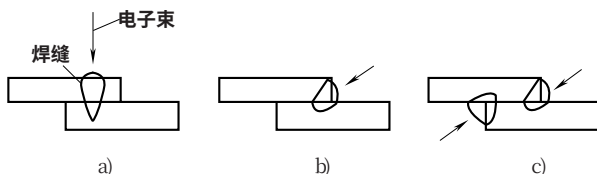


图 4-2-16 电子束焊搭接接头形式

- a) 熔透焊缝 b) 单面角焊缝 c) 双面角焊缝

5. 端接接头

图 4-2-17 为端接接头形式。厚板端接接头需采用大功率电子束深熔透焊接。薄板或不等厚度的端接接头则用小功率或散焦电子束进行焊接。

6. 避免应力集中

对重要承力结构, 焊缝设计应避开应力集中区, 如结构的棱角、边缘、截面突变处。设计时可用对接接头代替角接头, 如图 4-2-18 所示, 将焊缝挪动一定距离 d , 避开结构的棱角, 以改善角接头或 T 形接头的动载特性, 于是可从两个方向 (a 或 b) 进行焊接, 当工件是磁性材料, 又必须从 a 向进行焊接时, 接缝到腹板的距离 d 应足够大。对于厚度差较大的接头, 宜采用厚板削薄将不等厚度接头变成等厚度接头再进行焊接。

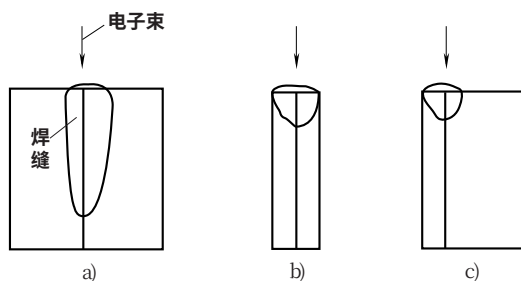


图 4-2-17 电子束焊的端接头形式

a) 厚板 b) 薄板 c) 不等厚度接头

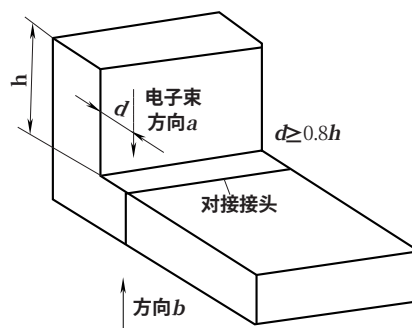


图 4-2-18 用对接接头代替角接头

7. 分层焊缝

对于多层结构中各层的接头位置相同时，可采用分层焊缝的接头设计。分层焊缝是指在同一个截面上有几层对接接头采用电子束一次性穿透焊接而成的焊缝，如图 4-2-19 所示。为了保证各层焊缝成形均良好，需反复进行焊接试验，优化电子束焊的焊接参数。

8. 杆管对接

杆状、管状对接也是电子束焊常用的接头形式，如图 4-2-20 所示。焊接过程中工件回转，电子束垂直于工件回转轴。根据装配定位和接头熔透深度要求，常采用带锁底对接接头。当采用无锁底对接接头时，焊前需要采用夹具或定位焊缝对焊件进行定位固定。

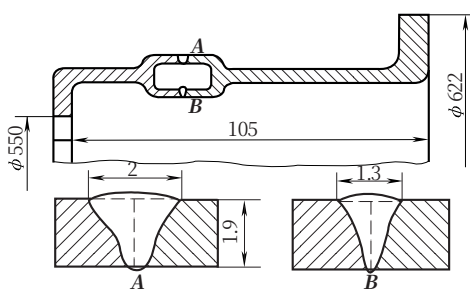


图 4-2-19 分层环形焊缝

A—外层焊缝 B—内层焊缝

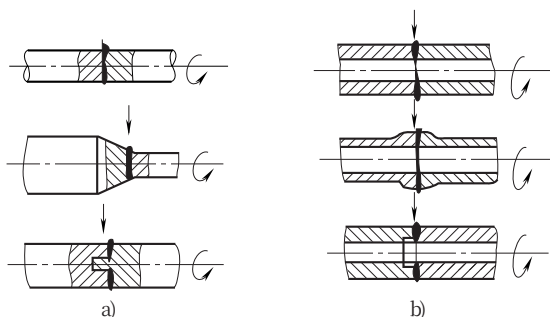


图 4-2-20 杆-管对接接头形式

2.3 各种材料的电子束焊

2.3.1 焊接性的影响因素

熔焊过程有两个特征：冶金过程和热过程。材料焊接性也可分为冶金焊接性和热焊接性。冶金焊接性研究的是：在焊接高温下，熔池金属与焊接空间的气相、液相等之间发生了一系列物理-化学反应，导致材料焊接性的变化。冶金反应包括合金元素的氧化、还原、蒸发，从而影响焊缝金属的化学成分和性能；氧、氢、氮等元素的溶解、析出对生成气孔及对焊缝性能的影响；在熔化金属凝固期间，由于熔池金属的化学成分、结晶条件以及接头刚度等因素的影响而产生热裂纹等。热焊接性研究的是：在焊接过程中，焊接输入的热量使母材和焊接材料熔化以形成焊缝，同时在焊缝附近产生一个热影响区，使得该区域金属的显微组织发生了显著变化，导致力学性能、硬度、耐腐蚀性

等发生的变化。

材料本身的化学成分对冶金焊接性起主要作用，但不能忽略焊接材料、焊接方法、保护条件等对材料焊接性的重要作用。影响材料工艺焊接性的因素有以下方面：

1. 焊接材料

焊接过程中，焊接材料和母材一起熔化形成熔池，并发生一系列的物理-化学冶金反应，直接影响到焊接接头的质量。焊材选择（匹配）不当，会造成焊缝金属的化学成分变化，力学性能降低或出现气孔、裂纹等严重缺陷。

2. 焊接方法和工艺措施

对于同一母材，采用不同的焊接方法，其工艺焊接性也有很大差别，如 Ti 合金采用真空电子束焊就比焊条电弧焊更容易获得满意的焊接接头。

焊接工艺措施也是改善和提高结构件使用性能的重要手段。如采用焊前预热和焊后缓冷，可以降低焊缝金属和热影响区的冷却速度，形成塑韧性良好的金相组织，防止出现淬硬组织、降低焊接应力，避免焊缝或热影响区开裂等。

3. 焊接接头的设计

焊接接头的设计内容包括截面厚度、接头形状、位置分布、接头的拘束等。接头设计对工艺焊接性的主要影响是：强烈影响焊缝金属和热影响区的冷却速度；决定冷却和收缩时的应力分布。在结构设计时，应该力求使焊接接头处于最小刚度的状态，能够自由收缩，有利于防止出现焊接裂纹。同时接头设计应避免焊缝处于构件的边缘、棱角、构件截面突变处，或交叉焊缝和接头金属隆起（突起）等，容易产生应力集中。

4. 焊接结构的使用条件

焊接结构的使用条件有工作温度高低、工作介质的种类、承受载荷的性质等。使用条件的不同对焊接接头的要求也不同，例如，在腐蚀介质中工作的焊接结构，要求焊接接头具有良好的耐蚀性。在高温下工作的焊接接头，应具有抗蠕变性能，承受冲击载荷下的结构件，则要求焊接接头具有良好的冲击性能。焊接结构的工作条件越苛刻越严酷，材料工艺焊接性往往越差。

2.3.2 中碳调质钢的焊接

中碳调质钢中碳的质量分数为 0.25% ~ 0.5%，并加入了适量合金元素（Mn、Si、Cr、Ni、B、Mo、W、V、Ti 等）以保证钢的淬透性，通过调质处理以获得较好的综合性能。中碳调质钢的屈服强度可达到 880 ~ 1176 MPa。常用的牌号有 30CrMnSiA、30CrMnSiNi2A、40CrMnSiMoVA、35CrMoA、35CrMoVA、34CrNi13MoA、40CrNiMoA 等。中碳调质钢焊接中的主要问题是冷裂纹、过热区的脆化及焊接热影响区的软化等。

1. 冷裂纹敏感性

中碳调质钢焊接时出现冷裂纹的主要原因是：中碳调质钢含碳量较高，淬硬倾向大，焊缝和热影响区易形成马氏体组织，增大了焊接接头的冷裂倾向；在焊接接头中过高的拘束应力和扩散氢含量，则会促使冷裂纹产生。后者取决于结构和焊接工艺，前者则取决于材料的淬硬倾向，材料对冷裂纹的敏感性，与碳当量有关，碳当量越高，冷裂倾向越大。碳当量的计算有很多经验公式，其适用范围略有差异，使用时应注意。

2. 过热区脆化问题

由于中碳调质钢中碳及合金元素含量较高，有相当高的淬硬性，因而在焊接热影响区的过热区内产生大量脆性的马氏体组织。且冷却速度越大，生成的马氏体组织越多，脆化越严重。

3. 热影响区的软化问题

中碳调质钢焊接时，在热影响区中加热温度超过调质处理的回火温度的区域，将会出现一个强

度、硬度低于母材的软化带。采用不同的焊接工艺,可以改变软化带的宽度和软化程度,但并不能消除软化现象。

4. 中碳调质钢的焊接工艺

(1) 预热及后热处理 中碳调质钢淬硬倾向大,为了防止产生冷裂纹,常采取焊前预热、焊后缓冷等措施。预热不仅能降低冷却速度,防止产生冷裂纹,还可降低热影响区的硬度,改善焊接接头的塑性;后热有助于降低冷却速度,消除焊接残余应力和改善接头性能,降低焊接接头冷裂纹倾向。预热温度为 $200 \sim 350^{\circ}\text{C}$,后热温度为 300°C 左右。若焊件处于退火状态,焊后不能即时进行调质处理,则必须在焊后进行中间热处理,在等于或高于预热温度下进行保温一段时间的热处理,如低温回火或 $650 \sim 680^{\circ}\text{C}$ 高温回火。若焊件焊前处于调质处理状态,其预热温度、层间温度及热处理温度都应比母材淬火后的回火温度低 50°C 。对于小型焊件,也可以利用散焦电子束对焊缝进行局部扫描加热,代替整体预热或后热处理。

(2) 焊接材料 若需添加填充材料,为了防止产生裂纹,宜采用低碳焊丝,焊丝中的碳的质量分数应控制左 0.15% 以内,最高不超过 0.25% ,并且严格控制硫、磷的质量分数,使其小于 0.035% 。

(3) 真空度 真空度不小于 $2 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 。相同功率下,真空度越高,电子束越不易散射,束流的能量密度越集中,焊缝的热影响区越窄。

(4) 提高加速电压 增加加速电压 U_a ,进一步提高电子束焦点的功率密度,使能量更为集中,从而使热影响区的软化带宽度更窄。

(5) 选择合适的焊接速度 为避免焊接冷裂纹和过热区的脆化,焊接速度不宜太快,为减小热影响区的软化程度,也不能选用太慢的焊接速度。

(6) 热输入 中碳调质钢宜采用小热输入焊接,以有利于减少淬火区的高温停留时间,降低奥氏体的晶粒长大,从而降低淬火区的脆化程度。热输入取决于加速电压 U 、电子束电流 I 和焊接速度 v 比值, $Q = UI/v$ 。

2.3.3 不锈钢的焊接

不同类型的不锈钢焊接时出现的主要问题不尽相同。

1. 奥氏体不锈钢的焊接

与其他类型不锈钢相比,奥氏体不锈钢焊接性最好。但是在焊接热循环作用下,可能产生如下的一些问题。

(1) 热裂纹倾向 奥氏体不锈钢的线膨胀系数大,焊接时产生较大的残余应力;奥氏体不锈钢的热导率小、热阻比较大,容易过热,熔池结晶时容易形成粗大柱状晶,且方向性比较强;由于奥氏体不锈钢中含有Ni和其他合金元素以及杂质,如S、P、Sn、Sb、Si、B、Nb等,容易形成低熔点共晶体和化合物,如 Ni_3S_2 的熔点是 645°C ,Ni- Ni_3S_2 共晶体的熔点是 625°C ,Ni-P共晶体的熔点是 880°C ,FeS的熔点是 980°C ,Fe-P共晶体的熔点是 1050°C ;同时奥氏体不锈钢液固相区间大,合金元素容易形成局域偏析;局域成分偏析和液固相区间扩大,有利于焊接热裂纹的形成。

对于18-8型奥氏体不锈钢来说,防止热裂纹的主要措施如下:

1) 调整焊缝化学成分 向焊缝加填充金属,使其生成含 $5\% \sim 10\%$ 铁素体(体积分数)的双相组织。在18-8型奥氏体不锈钢焊接时,焊缝中具有少量铁素体的双相组织,不仅可以有效地防止热裂纹。而且可以有效地防止焊缝的晶间腐蚀。

2) 降低焊缝金属中有害元素 如S、P、C等,在铬-镍奥氏体不锈钢中,由于Ni的存在,S、P和Ni能形成熔点很低的共晶体和化合物;另一方面S、P在Fe和Ni中的溶解度极低,更容易偏析。碳不仅增加热裂倾向,而且增加晶间腐蚀倾向。

3) 采用小热输入焊接 限制热输入, 增大冷却速度, 防止熔池过热、晶粒粗化等, 有利于降低热裂倾向。

奥氏体不锈钢焊接时, 不仅焊缝中会产生结晶裂纹, 还会产生液化裂纹, 液化裂纹多发生在熔合区的母材一侧, 多层焊时也可能发生在层间熔合区。从本质上讲, 液化裂纹也是由于晶界低熔点液膜在焊接热应力作用下形成的, 也属于热裂纹的范畴, 所不同的是结晶裂纹是在焊缝冷却凝固过程形成的, 而液化裂纹是在过热区的母材侧加热过程中形成的。通常情况下, 液化裂纹多发生在单相 25-20 型奥氏体不锈钢中, 在双相奥氏体不锈钢中比较少见。因为单相奥氏体不锈钢的晶粒在加热时容易长大, 例如加热到 1350 ~ 1360℃ 时, 25-20 型不锈钢的晶粒尺寸要比 18-8 型不锈钢大 50% ~ 60%, 晶界液膜的熔点为 1355 ~ 1360℃, 比实际固相线 1420℃ 要低 60℃ 以上。

减轻液化裂纹的根本措施是: 减少母材及焊缝中的有害杂质的含量, 防止局域成分偏析与低熔点共晶体的形成; 在焊接工艺上防止过热, 减小晶粒长大程度, 采用较小的焊接热输入等都有利于防止液化裂纹的产生。

(2) 焊接接头的腐蚀破坏 奥氏体不锈钢焊接接头在服役过程中, 接触腐蚀介质, 常常发生腐蚀性破坏。不锈钢焊接接头的腐蚀分为晶间腐蚀、点蚀、坑蚀、缝隙腐蚀等, 有时也会出现熔合区刀状腐蚀。

1) 晶间腐蚀。产生晶间腐蚀的原因是焊接过程中焊缝的合金元素发生变化, 其中主要是渗碳和铬的烧损以及杂质的偏析; 其次是过大的焊接热输入引起的粗晶; 另外多层多道焊时, 后一道焊缝对前一道焊缝的“敏化处理”, 都可能引起晶间腐蚀。

2) 刀状腐蚀。沿熔合区发生宽度为 1.0 ~ 1.5 mm (最大可达 3 ~ 5 mm) 的集中腐蚀, 像刀切一样, 称为刀状腐蚀。对于 1Cr18Ni9Ti[⊙]、Cr18Ni12Mo3Ti[⊙] 等含 Ti、Nb 稳定化元素的奥氏体不锈钢, 刀状腐蚀往往发生在熔合区的母材一侧, 这是由于焊接加热过程中, 在峰值温度超过 1200℃ 的过热区发生了碳化物分解重溶, 在随后的冷却过程中碳又向晶界扩散聚集, 在敏化温度区间形成铬的碳化物, 导致沿晶界的贫铬区, 而产生晶界腐蚀, 因此刀状腐蚀是一种特殊形式的晶间腐蚀。

对于 14Cr17Ni2[⊙] 等双相不锈钢或铁素体不锈钢, 在焊接热循环的作用下, 由于碳从母材向液态熔池扩散, 并在熔合区的焊缝侧形成增碳层, 在腐蚀介质中发生增碳层的选择性腐蚀, 形成刀状腐蚀。

3) 焊缝的均匀腐蚀和热影响区的集中腐蚀。焊缝的均匀腐蚀或热影响区的集中腐蚀产生的主要原因是焊接材料使用不当。当焊缝的电极电位低于母材金属时, 焊缝将会发生均匀腐蚀; 反之, 近缝区母材将会发生集中腐蚀。

4) 点蚀。焊接接头的点蚀, 特别是焊缝的点蚀, 主要与焊缝的杂质含量及其成分偏析有关。

5) 应力腐蚀破坏。在含有 Cl⁻ 离子腐蚀介质的环境中服役时, 焊接接头还会出现应力腐蚀破坏。焊接残余应力是引起接头应力腐蚀破坏的主要原因。

对 18-8 型奥氏体不锈钢, 防止晶间腐蚀的主要措施如下:

1) 降低焊缝的含碳量, 选用超低碳不锈钢焊接材料, 焊接材料中碳的质量分数 ≤ 0.03%。

2) 在焊缝中加入一定量的稳定化元素, 如 Ti、Nb 等, 焊缝中稳定化元素与碳的比值要求大于母材。

3) 调整焊缝金属化学成分, 使焊缝金属具有 5% ~ 10% (体积分数) 的铁素体, 由于高铬铁素体沿奥氏体晶界存在, 因而就堵塞了沿奥氏体晶界的腐蚀通道。

4) 采用较小的焊接热输入。

⊙ 在 GB/T 20878—2007 《不锈钢和耐热钢 牌号及化学成分》中没有与之对应的新牌号, 故此保留旧标准牌号。下同。

⊙ 此为新标准牌号。

5) 焊后进行固溶处理, 如 1Cr18Ni9Ti 加热到 920 ~ 1150℃, 然后快冷, 使碳化物分解重溶及铬均匀化。

防止点蚀的主要措施有: 尽可能地净化焊缝, 采用较小的焊接热输入, 防止粗晶, 减少焊缝的工艺缺陷。

防止焊缝的均匀腐蚀和热影响区的集中腐蚀的措施: 不锈钢焊接时, 选择填充金属不仅要考虑二者等强性, 而且要求熔覆金属的化学成分与母材相同, 组织相似, 焊缝与母材电极电位相等。

防止应力腐蚀的主要措施有: 在接头设计时要避免产生应力集中和出现交叉焊缝, 避免强迫装配, 工艺上避免出现未焊透、咬边等缺陷, 减少焊缝余高, 采用合理的焊接顺序等; 另外, 消除残余应力处理, 也有利于降低残余应力, 防止接头发生应力腐蚀破坏。

(3) 接头的脆化问题 奥氏体不锈钢焊接接头在低温或高温条件下, 有时会发生脆化问题。

1) 低温脆化: 亚稳定 18-8 型奥氏体不锈钢焊接时, 焊缝中的少量铁素体将使接头的低温韧性恶化, 而单一的奥氏体焊缝可以避免接头的低温脆化。

2) 高温脆化: 如果奥氏体不锈钢焊缝中含有较多的铁素体化元素或较多的 δ 相时, 将会产生显著的高温脆化现象。例如 1Cr18Ni10VNB[⊙] 奥氏体不锈钢, 当焊缝中含有 25% δ 相 (体积分数) 时, 焊态下 U 型缺口冲击韧性 A_k 值为 83.5J/cm²; 650℃ 加热 2h 后, A_k 值为 70.5J/cm²; 750℃ 加热 2h 后, A_k 值仅为 24.5J/cm²。这是因为 δ 相在 590℃ 以上高温下发生了 $\delta \rightarrow \sigma$ 转变, σ 相沿晶界析出而导致脆化。因此, 长期高温下工作的奥氏体不锈钢焊缝中的 δ 相必须小于 5% (体积分数)。防止接头的脆化的主要措施如下:

① 控制焊缝成分, 形成单一奥氏体组织。

② 限制热输入, 避免焊接接头在 800 ~ 900℃ 长时间停留。

(4) 焊接变形问题 奥氏体不锈钢由于热导率小, 热阻大, 而线膨胀系数大, 在自由状态下焊接时, 容易产生较大的焊接变形。特别是薄板奥氏体不锈钢焊接时, 变形会相当严重。防止焊接变形的措施如下:

1) 采用能量集中的电子束焊。

2) 限制热输入, 用较小的热输入焊接。

2. 马氏体不锈钢的焊接

马氏体不锈钢焊接时主要存在如下的一些问题:

(1) 冷裂纹倾向 容易形成淬硬组织是马氏体不锈钢产生冷裂纹的主要原因, 而且含碳量越高, 淬硬性越强, 冷裂倾向就越大。马氏体不锈钢在焊接时, 过热区的晶粒容易长大, 导致粗晶脆化。马氏体不锈钢的导热性较差, 焊接残余应力较大, 如果工件的厚度较大或接头的拘束度较大, 则更容易产生冷裂纹; 如果焊接接头中扩散氢含量比较高, 对冷裂纹就更加敏感。

对于低碳、超低碳马氏体不锈钢, 经淬火和一次回火或二次回火热处理后, 形成低碳马氏体 + 逆变奥氏体复合相组织, 冷裂纹的倾向性相对较小; 对于含碳和镍等奥氏体形成元素较少而铁素体形成元素含量较多的马氏体不锈钢, 淬火后除了形成马氏体外, 还保留部分铁素体组织, 则具有冷裂纹倾向。

(2) 接头脆化 马氏体不锈钢焊接时, 当加热温度超过 1150℃ 时, 热影响区的晶粒将会严重长大, 发生晶粒粗化现象。如 12Cr13、12Cr12[⊙] 热强钢, 其化学成分使其组织处于马氏体—铁素体的边界上, 即舍夫勒图的 M-A 边界区, 在焊接时, 当冷却速度小于 10℃/s, 近缝区就会出现粗大的铁素体和碳化物组织, 使接头的塑韧性显著降低; 而当冷却速度较大时, 例如大于 40℃/s, 又

⊙ 旧标准牌号, 没有对应的新标准牌号。

⊙ 新标准牌号。

形成粗大的马氏体组织,也会使接头的塑韧性下降。因此,焊接时控制其冷却速度很重要。

马氏体不锈钢焊接主要工艺措施如下:

1) 焊前预热。马氏体不锈钢冷裂纹倾向大,焊前需要预热,预热温度与钢中含碳量有关, $w(C) < 0.05\%$ 时,预热温度为 $100 \sim 150^{\circ}\text{C}$;当 $w(C) = 0.05 \sim 0.15\%$ 时,预热温度为 $200 \sim 250^{\circ}\text{C}$;当 $w(C) > 0.15\%$ 时,预热温度为 $300 \sim 350^{\circ}\text{C}$;对于马氏体不锈钢预热温度不超过 400°C ,否则有可能产生 475°C 脆化。多层多道焊时层间温度应保持在预热温度。

2) 焊后热处理。在调质状态下马氏体不锈钢焊接,焊后必须立即进行去应力回火处理,回火温度不超过材料调质处理时的回火温度。去应力回火温度一般在 $650 \sim 750^{\circ}\text{C}$ 之间,保温时间按 2.4min/mm 确定。对于耐蚀性较高的焊件,回火温度应取下限。

3) 马氏体不锈钢焊接与中碳调质钢焊接相似,应严格控制焊接热输入,焊接热输入不宜过大,以防止接头粗晶脆化。

4) 尽可能降低焊缝金属中扩散氢的含量。

5) 降低接头应力、降低焊接接头拘束度、焊前预热及焊后去应力退火处理等措施均有利于防止冷裂纹形成。

3. 铁素体不锈钢的焊接

铁素体不锈钢焊接时,主要存在如下一些问题:

(1) 接头脆化

1) 粗晶脆化。铁素体不锈钢焊接时,在加热到 950°C 以上的近缝区,晶粒容易长大、形成粗大的铁素体,导致接头的塑性大幅度降低;而且铁素体不锈钢随着 C、N 含量的提高,脆性转变温度有所提高;在拘束度较大的条件下焊接时,很容易产生焊接裂纹。

2) 475°C 脆化。高铬铁素体不锈钢在 $400 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 温度区间加热时,析出富 Cr 的 α' 相,并与母材之间经常保持共格关系, α' 相的析出是高铬铁素体钢 475°C 脆化的主要原因。

3) σ 相析出脆化。高铬铁素体不锈钢在 $550 \sim 820^{\circ}\text{C}$ 温度区间长期加热时,将会析出 σ 相,不仅使钢脆化,还会降低钢的耐蚀性。一旦发生 σ 相析出,可以通过 850°C 以上加热,使 σ 相分解重溶,即可消除 σ 相的脆化作用。

(2) 晶间腐蚀 高铬铁素体不锈钢也有晶间腐蚀倾向,但与 Cr-Ni 奥氏体不锈钢不同,Cr-Ni 奥氏体不锈钢系在敏化温度范围内重复加热后产生晶间腐蚀倾向,而高铬铁素体不锈钢在高温下急冷即可能产生晶间腐蚀倾向。例如 Cr17 铁素体不锈钢从 $1100 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 急冷、Cr25 从 $1000 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 急冷就会产生晶间腐蚀倾向,但是再经过 $650 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 加热缓冷以后,可以消除铁素体不锈钢的这种晶间腐蚀倾向。

防止焊缝晶间腐蚀的主要措施如下:

1) 尽可能降低焊缝金属中 C 和 N 的含量,例如,近几年研制的碳和氮的质量分数之和 $\leq 0.010\%$ 超纯铁素体不锈钢,基本上就没有晶间腐蚀倾向。

2) 焊后进行 $700 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 的退火处理,使铬重新均匀化。

对于铁素体不锈钢,在相当于经历 $500 \sim 800^{\circ}\text{C}$ 敏化温度的热影响区,会产生晶间腐蚀。

防止热影响区晶间腐蚀的主要措施有以下几种:尽可能缩短热影响区在敏化温度区间的停留时间,采用尽可能小的焊接热输入,焊接时尽可能减小横向摆动,或者焊后进行热处理,对于奥氏体不锈钢焊后进行固溶处理,对于铁素体不锈钢焊后进行退火处理。

防止刀蚀的主要措施有以下几种:降低焊缝的碳含量,采用超低碳焊接材料,小的焊接热输入,以及焊后热处理。对于奥氏体不锈钢采用焊后固溶处理,对于铁素体不锈钢采用焊后退火处理。

综上所述,铁素体不锈钢焊接的工艺措施如下:

1) 避免在 950°C 以上长时间加热,防止形成粗大的铁素体而导致脆化;尽可能地限制杂质元素进入焊缝金属,尽量避免在 $400 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 温度区间加热以及尽量缩短在此温度区间的停留时间,

控制焊接热输入及预热温度等,避免 475℃脆化。

2) 焊前低温预热 为了防止接头脆化产生裂纹,必须预热;但预热温度过高,反而会加剧接头粗晶脆化,预热温度控制在 100~200℃。

3) 焊后热处理 焊后热处理可以使铬重新均匀化,碳、氮化合物球化,消除晶间腐蚀倾向;提高接头的塑性、改善接头的力学性能,防止产生裂纹。对于采用同质材料焊接的铁素体不锈钢,焊后需进行 650~850℃退火处理。

4) 尽可能采用小热输入焊接,减少热输入。多层焊时,层间温度不宜超过 150℃,防止过热。

4. 双相不锈钢焊接

(1) 双相不锈钢焊接的主要问题 双相不锈钢焊接主要问题是 475℃脆化和 σ 相析出脆化。其形成机制如下:

1) 焊接接头两相组织比例失调:双相不锈钢焊缝凝固时先结晶出 δ 铁素体,当温度进一步降低时,发生 $\delta \rightarrow \gamma$ 的固态相变,冷却至室温时,会保留部分 δ 铁素体,形成 $\delta + \gamma$ 的双相组织。

在焊接加热过程中,当热影响区的温度超过双相钢的固溶处理温度(1150~1400℃)时,晶粒将会长大,并且发生 $\gamma \rightarrow \delta$ 相变,使 γ 相减少, δ 相增加,热影响区中过热区有可能出现单一的粗大 δ 相组织;如随后的冷却速度过快,将会抑制 $\delta \rightarrow \gamma$ 二次相变,使热影响区的两相组织比例失调。当双相不锈钢中 δ 铁素体含量大于 70% 时,二次相变的奥氏体会变成针状或羽毛状组织,引起接头脆化。

双相不锈钢焊接时,由于冷却速度较快,在熔池凝固过程中 $\delta \rightarrow \gamma$ 的固态相变受到抑制,即使焊缝金属的化学成分与母材相同,但焊缝金属中的 δ 相也比母材高得多。

2) x 相、 σ 相析出 双相不锈钢在 600~1000℃ 温度范围内较长时间加热并缓冷时,会有 x 相、 σ 相以及碳化物 (Cr_{23}C_6)、氮化物 (Cr_2N 、 CrN) 金属间化合物析出,而且当 Cr、Mo 含量较高或双相不锈钢中含有 Cu、W 时,会加剧脆性相的析出。脆性相和金属间化合物的析出,使双相不锈钢焊接接头塑性及抗蚀性大幅度降低。

3) 固溶度影响 在焊接热循环作用下,使双相不锈钢焊接接头区的两相比例变化, δ 相远多于 γ 相。由于 C 和 N 在铁素体中的固溶度很低 [$w(\text{C}) < 0.02\%$, $w(\text{N}) < 0.05\%$],而在奥氏体中固溶度较高 [$w(\text{C}) \approx 2.16\%$, $w(\text{N}) \approx 0.2 \sim 0.5\%$], γ 相的减少进一步促使碳化物、氮化物及 σ 相等的析出; δ 相的增加,475℃脆化倾向也随之增大。

(2) 双相不锈钢焊接工艺 工业中使用的双相不锈钢有:Cr18 型、Cr23 (不含 Mo) 型、Cr22 型、Cr25 型。Cr18 型双相不锈钢列入国家标准 GB/T 20878—2007 的牌号有 022Cr19Ni5Mo3Si2N 和 14Cr18Ni11Si4AlTi 两种。

1) Cr18 型双相不锈钢焊接工艺要点:022Cr18Ni5Mo3Si2N 属于超低碳双相不锈钢,具有良好的焊接性,两相组织的比例相对比较稳定、焊接冷裂纹及热裂纹的敏感性低,接头的脆化倾向小;而 14Cr18Ni11Si4AlTi 双相不锈钢的焊接性稍差,特别是 σ 相析出脆化及 475℃脆化倾向稍大。

① Cr18 型双相不锈钢焊接时,通常焊前不预热,焊后不作热处理。

② 选用组织、力学性能和耐蚀性与母材相匹配的超低碳双相不锈钢焊接材料。

③ Cr18 型双相不锈钢焊接时应尽可能采用较小的焊接热输入,降低焊缝热输入。

④ 在多层多道焊时,层间温度不得高于 100℃,施焊过程中,不做横向摆动,扫描。

2) Cr25 型双相不锈钢焊接工艺要点 Cr25 型不锈钢由于合金元素的含量比较高,且有 Mo 的加入,因而具有比较明显的 475℃脆性;在 600~1000℃ 温度范围内加热时,焊接热影响区及多层多道焊的焊缝金属中,容易析出 σ 相、 χ 相以及碳、氮化合物 (Cr_{23}C_6 、 Cr_2N 、 CrN) 和其他各种金属间化合物。另外,当冷却速度过快时将使 $\delta \rightarrow \gamma$ 的固态相变受到抑制,使两相组织的比例失调。

① Cr25 双相不锈钢焊接时,通常焊前不需要预热,焊后不作热处理,但有些焊接结构件是在较强的腐蚀性介质工况条件下服役的,焊后需对接头进行 1050~1080℃ 的固溶处理。

② 选用与母材金属成分相同或镍基的焊接材料,常用的有 Cr25-Ni9-Mo4 型和 Cr25-Ni5-Mo3 型

两种。

③ Cr25 型双相不锈钢焊接时, 选用中等偏小焊接热输入, 控制在 $10 \sim 15 \text{ kJ/cm}$ 范围内; 层间温度不高于 150°C 。基本原则是中薄板焊接时采用中小热输入, 中厚板焊接时采用较大热输入。

2.3.4 高温合金的焊接

1. 高温合金焊接的主要问题

高温合金焊接主要问题有: 焊缝结晶裂纹、热影响区液化裂纹和焊后热处理或高温使用时形成应变时效裂纹。

(1) 热裂纹敏感性 高温合金中除了形成奥氏体的基本组元 Ni、Fe、Cr、Co 之外, 不同类型的合金中添加不同合金元素, 通过不同强化机制以获得所需的高温性能。其中固溶强化元素有 W、Mo、Cr、Re、Al、Nb、Ta; 沉淀析出强化元素有 Al、Ti、Nb、Mo、Hf 形成金属间化合物; 碳化物、硼化物形成元素有 C、B、Cr、W、Mo、Nb、Ta、Zr、Hf; 弥散强化质点: Al_2O_3 、 ThO_3 、 Y_2O_3 ; 晶界强化元素有 B、Mg、Ce、Y、Zr、Hf。合金中组元多; 功能非单一, 作用复杂; 元素含量难于控制; 合金液固相线区间大, 增加热裂纹敏感性。

1) 结晶裂纹。结晶裂纹是在焊缝金属凝固时形成的热裂纹, 主要影响因素有母材的化学成分及材料焊前热处理状态、变形程度、拘束度和焊接热输入等。

① 合金元素的影响。适当增加钼的含量, 可提高合金的抗裂性。钼含量较高或钼和钨含量较高的镍基合金, 均具有优良的焊接性, 焊缝具有很高的抗结晶裂纹的能力。

随着铝、钛含量的提高, 高温合金的焊接性变差。不仅在焊接过程中会产生结晶裂纹和液化裂纹, 而且还会在焊后热处理或高温加热过程中产生应变时效裂纹。在铝和钛总量相近条件下, 高铝和钛之比的合金具有较高的裂纹敏感性, 因此需控制铝和钛的含量之比。

碳在高温合金中均以碳化物 (M_{23}C_6 、 M_6C 、MC 等) 形式存在于晶界, 其性质是硬而脆, 当碳含量较高时, 则会析出连续薄膜、胞状或魏氏组织形态的碳化物, 对合金的韧性和焊接性有不良影响。此外, 碳和硼还可能形成碳硼化物共晶, 促进焊接结晶裂纹的形成。

微量硼可净化晶界, 改善合金的综合性能, 锆也有类似的作用, 但是当硼、锆含量稍高时, 会形成 M_3B_2 、 Ni_5Zr 与基体金属的低熔点共晶, 反而促使焊接裂纹的形成。硫、磷与镍形成低熔点共晶, 并向焊缝金属的晶界偏析, 将促使焊缝结晶裂纹的形成。

铜是促使一些高温合金产生焊接裂纹的有害元素, 例如微量铜可使钴基合金焊缝产生微裂纹, 故应防止铜进入焊缝。

② 材料焊前状态。所谓焊前状态是指合金构件的热处理状态, 冷变形程度及拘束度等。与时效处理的合金相比, 固溶处理合金具有较小的裂纹敏感性; 淬火软化合金则比冷轧变形合金裂纹敏感性低, 因合金经冷作变形后, 合金的硬度和强度增加, 塑性下降; 同样, 时效处理致使焊接件的拘束度增大, 裂纹敏感性也就增大。

③ 焊接热输入。随着焊接热输入增大, 高温合金的裂纹敏感性增大。因为高温合金的热导率低, 热阻大, 易于过热, 熔池温度过高; 线膨胀系数大, 焊接残余应力相应增大。焊接热输入(焊接电流)是影响高温合金焊接裂纹敏感性的主要因素。

防止焊缝结晶裂纹可以采取如下工艺措施:

① 采用能量集中、对熔化金属保护好的真空电子束焊方法进行焊接。

② 选用小热输入焊接, 减小焊接热输入, 改善熔池结晶形态, 减小偏析, 从而降低裂纹形成几率。

③ 采用抗裂性优良的焊丝如 HHC3113、SG-1、HGH3536、GH533。

④ 建议在固溶处理状态下进行焊接, 对于经过深度冲压成形或严重冷作矫形的构件, 焊前应作消除应力处理。

⑤ 降低接头拘束度。

2) 液化裂纹。高温合金焊接时具有产生液化裂纹的倾向。高温合金中含有某些强化组元,在晶界会形成偏析,生成碳化物相或共晶组织。焊接快速加热过程中,在靠近焊缝被加热至固-液相温度区间的区域,晶界上的低熔点相发生了熔化,在晶界上形成液膜,造成晶界液化。当焊接接头拘束度较大,晶界液膜承受不了接头的拘束应力的作用时,则被拉开,形成液化裂纹。合金材料的晶粒粗大,晶界上有较多碳化物、硼化物、 $\gamma + \gamma'$ 共晶相,则对焊接热影响区液化裂纹较敏感。

防止液化裂纹工艺措施包括尽可能降低焊接热输入、减小过热区和母材高温停留时间。

3) 应变时效裂纹。铝钛含量高的沉淀强化高温合金和铸造高温合金焊接后,在时效处理过程中,在熔合线附近会产生一种沿晶扩展的裂纹,称为应变时效裂纹。

应变时效裂纹的形成与两个因素有关:焊接残余应力和拘束应力引起的应变;时效过程中塑性损失;两者共同作用引起应变时效裂纹。

防止应变时效裂纹应采取以下工艺措施:

① 在选用合金时,应选择含 Al、Ti 含量较低的合金;也可以对合金进行“过时效”处理(分级、慢冷的时效工艺),延长开裂时间,从而防止应变时效裂纹。

② 在焊接接头设计时,选用合理的形式和焊缝分布,以减小焊件的拘束度,降低接头应力;焊后对焊缝和热影响区进行合理的锤击或喷丸处理,将拉应力状态变成压应力状态。

③ 控制焊接热循环,避免热影响区中碳化物发生相变而引起脆性。

(2) 焊接接头组织的不均匀性 接头组织的不均匀性直接影响焊接接头的性能。

1) 固溶强化型高温合金。焊缝金属由变形组织变成铸造组织;由于焊接熔池冷却速度快,焊缝金属因晶内偏析,形成层状组织;当偏析严重时,甚至在枝晶间形成共晶组织。焊缝中的 TiN 或 Ti(CN) 为不规则分布的独立相,碳化物相多为 MC 相。热影响区金属发生沿晶界局部熔化和晶粒长大;直接影响接头的拉伸性能和疲劳性能。

2) 沉淀强化型高温合金。在焊接过程中,焊缝的金属发生了熔化、凝固的过程,强化相 γ' 或 γ'' 和碳化物、硼化物等均溶入基体,形成单一的 γ 固溶体组织;某些合金会生成初生 γ' ,从液态金属中析出 MC;由于焊缝金属冷却速度很快,形成了横向短主轴很长的树枝状晶,在树枝状晶间和主轴之间均存在较大的成分偏析,在焊缝中央会产生共晶组织。

热影响区存在组织梯度,如 GH4169 合金焊接热影响区中,在高温区 ($\geq 1030^\circ\text{C}$), γ' 、 γ'' 和 δ 相溶入 γ 基体中,失去 γ' 或 γ'' 的强化效果,晶粒明显长大;在中温区 ($760 \sim 1030^\circ\text{C}$),亚稳 γ'' 相转变为 δ 魏氏组织,强度和塑性显著下降。在低温区 ($600 \sim 760^\circ\text{C}$),晶界会析出块状 δ 相。在整个热影响区中 NbC 保持不变。

焊缝和热影响区组织不均匀性降低了焊接接头的力学性能。

(3) 焊接接头的等强性 高温合金构件在高温、复杂应力和有腐蚀介质的环境中工作,要求接头的高温强度、塑性与母材相同。由于焊缝及热影响区中晶粒长大、 γ' 强化相和碳化物的溶解形成的弱化区直接影响接头性能,事实上,焊接接头在焊态下的强度和塑性都不同程度地低于母材。焊接接头的等强性常用接头强度系数表示。接头强度系数为接头抗拉强度和母材抗拉强度之比。

固溶强化型高温合金自动氩弧焊的接头强度系数可达到 90% ~ 95%;电子束焊的接头强度系数可达到 95% ~ 98%;摩擦焊的接头强度系数可达到 95% ~ 100%。

沉淀强化型高温合金的接头强度系数较低,如氩弧焊的接头强度系数为 82% ~ 90%;焊后经固溶和时效处理,接头强度可接近母材水平。当采用非同质焊丝(不同于母材的焊丝)时,接头的强度更难以达到母材水平,接头塑性和持久强度均低于母材,而且焊接工艺不同,接头强度系数也不同。

2. 高温合金电子束焊工艺

(1) 母材状态 建议高温合金在固溶处理或退火状态下进行焊接。

(2) 接头设计 推荐采用对接、锁底对接和带垫板对接形式。对接接头的表面粗糙度 $Ra \leq 3.2 \mu\text{m}$, 不允许有裂纹、划伤等缺陷。

(3) 装配间隙 装配应使接头紧密贴合和对齐, 局部间隙不超过 0.08mm 或 0.05δ , 错位不大于 0.75mm 或 0.1δ (δ 为焊接厚度)。

(4) 工件去磁 有磁性的零件, 焊前应去磁, 磁通量密度不大于 $2 \times 10^{-4}\text{T}$, 有磁性的夹具及工作台也应去磁。

(5) 工件表面清理 清除工件表面氧化物、锈蚀、油污、灰尘等污染物质, 焊前用干净绸布蘸丙酮、酒精擦拭待焊接头, 风干后在进行焊接。

(6) 定位焊 焊件装配后利用电子束进行定位焊。定位焊点应合理布置, 确保装配间隙不变。定位焊点质量与正规焊缝质量一致, 应无焊接缺陷, 焊点尺寸不影响电子束焊。

(7) 焊接参数 根据母材化学成分、焊前状态、厚度、接头形式和焊缝尺寸的技术要求确定焊接参数; 高温合金焊接, 推荐采用低热输入和低焊接速度的工艺。

(8) 防止焊接裂纹工艺措施 主要措施如下:

- 1) 采用含杂质低的优质母材, 减少晶界的低熔点相。
- 2) 采用较低的焊接热输入, 防止热影响区晶粒长大和晶界局部液化。
- 3) 控制焊缝形状、减少应力集中。
- 4) 采用抗裂性良好的焊丝。对某些液化裂纹敏感的合金应采用低的热输入进行焊接。

(9) 防止焊缝气孔工艺措施 主要措施如下:

- 1) 加强零件的焊前清理, 接缝端面不应有气孔、缩孔、夹杂等缺陷。
- 2) 提高焊接端面的加工精度。
- 3) 适当限制焊接速度。
- 4) 在允许的条件下, 采用重熔焊接的方法。
- 5) 采用“上焦点”焊接或“扫描焊”方法。

(10) 防止未熔合和咬边的工艺措施 未熔合和咬边主要是由于电子束偏离接缝造成。防止未熔合和咬边的主要措施如下:

- 1) 保证焊接接头表面与电子束轴线垂直。
- 2) 对工具夹进行退磁, 防止残余磁性使电子束产生横向偏移, 造成偏焊。
- 3) 调整电子束的焦点位置, 保证电子束与接缝对中。

2.3.5 钛合金的焊接

1. 钛合金焊接的主要问题

(1) 间隙元素固溶脆化 间隙元素固溶脆化会产生如下影响:

- 1) 钛 300°C 开始吸氢、 600°C 开始吸氧, 700°C 开始吸氮, 氧、氮固溶于钛及其合金中, 使晶格发生畸变, 变形抗力增加。
- 2) 氮的溶解量增加, 会形成 TiN 化合物。
- 3) 氢气固溶于钛及其合金中, 焊缝析出片状、针状氢化物 TiH_2 。
- 4) 碳与钛结合生成脆性的 TiC 化合物, 导致强度和硬度显著增加, 塑性和韧性降低; 随着氧、氮、氢、碳含量增加, 焊缝金属性能进一步恶化。

(2) 焊接热作用下的相变 钛合金焊接, 由于熔点高, 比热容及热导率小, 焊接热影响区在高温下停留时间长, 容易使 β 相过热粗化, 接头塑性降低。

1) 工业纯钛。工业纯钛焊接性相对较好。如果焊缝中 Fe 的质量分数高于 0.05% , 在硝酸溶液中特别容易受腐蚀。因为在 Fe 稳定的残余 β 相与相邻 α 相之间存在的原电池腐蚀作用, 促进了

焊缝金属的腐蚀。如果焊接热输入高,焊缝高温停留时间长,晶粒长大,会产生粗晶脆化;若冷却速度过大,有时会产生针状 α' 相组织。

2) α 钛合金。 α 钛合金和近 α 钛合金焊缝和热影响区为锯齿状 α 和针状 α' 组织。其中 TA7 从低温到 251℃ 仍有高韧性,适用于低温使用,具有良好的耐蚀性和焊接性,若受到碳、氮、氧、氢等杂质污染,形成间隙固溶体和脆性相,导致接头脆化。此外,Fe 的污染会降低接头的耐蚀性。近 α 钛合金的焊接时,焊接残余应力可能较高,推荐对焊件进行消除应力退火。导致 α 钛合金焊接其接头塑性降低的主要原因是:焊缝为铸造组织,塑性低;单相 α 钛,在热过程中晶粒长大,产生粗晶脆化; α 钛合金焊接时,冷却速度过大,有时会产生针状 α' 组织,导致接头塑性下降。

3) $\alpha + \beta$ 合金。在室温下平衡组织为 $\alpha + \beta$ 。 $\alpha + \beta$ 合金在时效状态下焊接,焊接接头热影响区存在过时效区,导致接头强度下降。

其中 TC1 合金退火组织以 α 相为主,含极少量 β 相,焊接性良好,焊接时冷却速度以 12 ~ 150℃/s 为宜。采用合适焊接热输入,热输入增大,焊接热影响区高温停留时间长,晶粒粗大,析出 ω 相;焊接热输入过小, $\beta \rightarrow \alpha'$ 增多,变得细而密,接头塑性降低。

TC4 合金以 α 相为主, β 相较少。当加热到 β 相转变温度 ($996^\circ\text{C} \pm 14^\circ\text{C}$) 以上温度快冷时,发生 $\beta \rightarrow \alpha'$ 转变,在原始 β 晶粒上析出针状 α' 相 (α' 为钛过饱和和针状马氏体);焊接接头塑性(断面收缩率)下降,但断裂韧性仍比较高。TC4 合金一般在退火状态下使用,为提高强度,可在淬火状态下焊接,焊后进行时效处理。TC4 合金焊接时合适的冷却速度为 2 ~ 40℃/s,比 TC1 和 TA7 更低一些,因为过大的冷却速度会使 α' 相更细、更多,塑性下降更严重。

TC10 合金是一种高强度、高淬透性合金,由于合金元素含量较高,焊接性较差,厚 12mm 的 TC10 合金焊接时会出现热影响区裂纹。预热 250℃ 可预防裂纹并能提高接头塑性。

$\alpha + \beta$ 合金焊接时,注意降低接头拘束应力,防止产生热应力裂纹和冷裂纹。

4) β 合金。退火 β 合金在焊接状态下的焊接接头塑性好,其强度较低。如果焊缝在高温下使用,则会发生时效作用,导致塑性下降。对于 β 合金可以在退火状态下进行焊接,焊后对焊缝金属采用轻敲或精轧进行冷作处理,最后对整个焊件进行固溶处理和时效处理,以提高接头强度。

β 合金可分为亚稳 β 合金和稳定 β 合金两种。Ti-33Mo 合金其组织为稳定 β 相,是一种耐腐蚀钛合金,焊接时不发生相变,焊接性好。亚稳 β 合金 TB2 平衡组织为 β 和极少量 α 相,焊接时容易产生亚稳 β 相,在焊后热处理时析出 α 相,引起脆性。亚稳 β 合金焊接时,由于焊缝金属凝固时成分偏析,在焊后时效过程中,使焊缝中心区性能降低;建议在固溶处理状态下焊接,并在焊后直接进行时效处理。

$\alpha + \beta$ 合金和 β 合金焊接时,需选择合适的焊接热输入,热输入过小,焊缝及热影响区析出 α' 相;热输入过大,焊缝及热影响区可能析出 ω 相,导致接头脆化。

(3) 裂纹倾向 钛及钛合金中 S、P、C 等杂质含量少,很难在晶界形成低熔点共晶;结晶温度区间窄,加之焊接凝固时收缩量小,对焊接热裂纹不敏感。但对于 α 和 $\alpha + \beta$ 合金,若焊接时保护不良或 $\alpha + \beta$ 合金中含 β 稳定元素较多时,可能会出现热应力裂纹和冷裂纹。其原因在于:焊接冷却速度过大,熔合区母材金属析出 α' 相;焊缝中固溶氢向熔合区扩散,热影响区氢含量增加,形成 TiH_2 脆性化合物;加之焊接接头拘束应力作用,最终导致热影响区冷裂纹或延迟裂纹形成。工艺措施如下:

1) 降低焊接接头氢含量,例如选用氢含量低的材料(焊丝、母材、氩气保护),加强焊接区保护。

2) 工件表面清理,在可能的条件下,焊后进行真空去氢处理。

3) 降低接头残余应力,及时进行消除应力处理。

4) 控制焊接接头冷却速度,适宜的冷却速度 10 ~ 200℃/s,太快时针状 α' 相太多,太慢时过

热,晶粒粗化,都会使接头塑性降低。

(4) 气孔 钛及钛合金焊接气孔可分为焊缝中气孔和熔合线气孔。焊接热输入较大时,气孔一般位于熔合线附近;焊接热输入较小时,气孔则位于焊缝中部。产生气孔主要原因有以下几种:

1) 在拉丝时粘附在焊丝表面的润滑剂。

2) 焊接坡口有机物粘附:坡口打磨时残留在坡口表面的磨粒,清洗擦拭坡口时的残留有机物。

3) 薄板剪切时切口的粗糙的端面有机粘附。

4) 金属材料中的溶解氢。

5) 熔化金属的保护不良。

防止气孔的工艺措施有以下方面:

1) 降低熔池中氢含量:采用沾有溶剂的绸布擦拭焊丝润滑剂;清理焊接坡口粘附;去掉切口毛刺和降低表面粗糙度。

2) 不同焊接方法的气孔敏感性也不同。因为不同的工艺方法焊接参数、焊接热输入不同,焊接过程中熔池形状和熔池高温停留时间不同,对焊缝的熔池宽深比,高温停留时间长短,亦即对熔池中的气体逸出和气泡形成产生不同的影响所致;采用电子束焊在真空 ($<1.33 \times 10^{-2} \text{Pa}$) 条件下进行,有利于降低气孔敏感性。

3) 采用电子束焊加重熔焊道,焊接速度低于 30cm/min 以下,有利于熔池中气体逸出。

4) 用碱或碱土金属的氟化物为基的熔剂对熔池进行冶金处理,对消除焊缝气孔十分有效。例如将氟化钙加入熔池,可以消除 30mm 厚钛合金焊缝中的气孔。

5) 电子束扫描可改善焊缝成形、细化晶粒和减少气孔,接头性能也随之提高。

2. 钛合金电子束焊工艺

真空电子束焊具有一系列的优点:焊缝窄、深宽比大、焊缝角变形小,焊缝及热影响区晶粒细、接头性能好;真空保护下焊缝和热影响区不会被空气侵入,冶金质量高;焊接厚件时效率高。

1) 提高真空度,防止氧、氮、氢、碳有害元素进入焊缝金属。

2) 严格清理焊接接头,采用酒精、丙酮清洗工件表面油脂,消除熔池的氢来源,砂纸和机械清除工件表面氧化膜,防止产生气孔。

3) 需要加填充金属,尽可能采用 Fe 含量低的焊丝;排除所有 Fe 污染源,防止焊接接头耐蚀性下降。

4) 接头设计和接头装夹,应尽量降低接头应力;控制接头装配间隙,减小焊接变形。

5) 为了改善电子束焊缝成形,可采用焊接+重熔两道焊,第一道为高功率密度的深熔焊,第二道为低功率密度的修饰焊,以改善接头疲劳性能。

6) 采用电子束扫描可改善焊缝成形、细化晶粒和减少气孔,以提高接头性能。有时背面加垫板,用以预防未焊透或成形不良带来的不利影响。

2.3.6 铝合金的焊接

1. 铝合金焊接的主要问题

(1) 氧化性 铝和氧亲和力大,空气中在材料表面极易生成致密的 Al_2O_3 氧化膜,厚度约 $0.1\mu\text{m}$ 。 Al_2O_3 氧化膜熔点高 (2050°C),约为纯铝的 3 倍,密度约为铝合金的 1.4 倍,性能稳定,不易去除,焊接过程中氧化膜阻碍焊缝金属之间的结合,造成夹渣; Al_2O_3 薄膜能吸潮,会增加焊缝气孔敏感性。

(2) 焊接裂纹 焊接裂纹严重破坏焊接接头的连续性,产生应力集中,成为焊接结构低应力

脆性断裂、疲劳断裂、延时断裂的源。铝热膨胀系数大，是钢的2倍，凝固收缩率约为5%，在拘束条件下焊接热应力较大，是产生焊接裂纹的力学条件；焊缝结晶过程中晶界存在低熔点共晶体，在已凝固的晶粒间形成液膜，是产生焊接结晶裂纹的冶金因素；近熔合线的母材在焊接热循环作用下，晶界低熔点共晶体发生聚簇、熔化，在晶间形成液膜，为焊接热影响区产生液化裂纹提供了冶金条件。铝及铝合金焊接裂纹分为结晶裂纹、液化裂纹和应力腐蚀裂纹。

1) 结晶裂纹：焊缝凝固过程中晶界处于固-液状态的低熔点共晶体在接头拉伸应力作用下被拉开，形成裂纹，断裂面为自由结晶表面，开裂部位在焊缝上，多平行于焊缝。

2) 液化裂纹：焊接过程中，邻近熔合线的母材金属中，由于晶界上的低熔点共晶体发生了熔化，在凝固收缩应力或外力的作用下发生沿晶开裂，断裂面为自由结晶表面。

3) 应力腐蚀开裂：焊接接头中存在原始的微裂纹源，大气和触腐蚀介质中，在应力及焊接残余应力作用下形成应力腐蚀开裂。

铝合金焊接热裂纹的防止措施如下：

1) 选用热裂纹敏感性低的合金材料。

2) 调整焊缝合金系或在填充金属中添加变质剂。目的在于：限制焊缝金属中的有害杂质，控制低熔点共晶体的量，并缩小结晶温度区间。而在填充金属中加入Ti、Zr、V和B等微量元素，力图通过细化晶粒来改善铝合金的塑性、韧性，达到防止焊接热裂纹的目的。

3) 控制焊接热输入，减少合金元素损失，防止熔池过热而形成方向性强的粗大柱状晶。合理设计焊接接头，避免应力集中，降低接头应力；结构装配时，降低接头刚性拘束度，有利于降低热裂纹倾向，改善抗裂性。而提高焊接速度，则使接头的应变速度增大，因而增加热裂的倾向。

(3) 焊缝气孔 焊缝气孔是铝及铝合金焊接的又一个重要问题。铝及铝合金化学成分不同，对气孔敏感性不同，但都可能产生焊缝气孔。

1) 气孔形成机理。铝及铝合金焊缝气孔内气体成分分析证实，铝合金焊缝气孔为氢气孔。氢在液态铝合金中的溶解度为 $0.46\mu\text{L/L}$ ，在固态铝合金中的溶解度为 $0.03\mu\text{L/L}$ ，二者相差约15倍。焊接熔池中液态金属吸收周围的氢，焊缝金属凝固时，超过溶解度的氢析出、长大、聚集，来不及逸出，形成焊缝气孔。有时在熔合线外侧也发现气孔，那可能是由于母材内溶解氢含量较高，焊接过程中母材受热氢发生聚集形成的。

2) 焊缝气孔的影响因素如下：

① 坡口清理不干净。清理后工件表面产生沟槽或微观凹凸，粗糙，则易吸湿气，增加气孔倾向。

② 真空除气。将焊件放在真空加热炉中，在一定真空度下加热到一定温度，保温一定时间，去除焊件中的氢气。加热到 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ ，能去除表面吸附的湿气，加热到 $450\sim 550^{\circ}\text{C}$ ，能去除氢氧化物 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 LiOH 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 中的氢；加热到 $650\sim 700^{\circ}\text{C}$ ，能去除溶解在金属中的氢。

③ 母材溶解氢。母材内部氢含量较高。用于焊接的铝及铝合金内部氢含量应控制在 0.33×10^{-6} （质量分数）以下，对于2219合金内部氢含量应控制在 0.16×10^{-6} （质量分数）以下。

④ 表面富氢层。铝合金铸锭在空气中热轧成板材时，表面吸收空气中的水分，形成表面富氢层。

⑤ 塑性变形层吸氢。坡口机械加工过程中在坡口表面上形成塑性变形层，变形层上形成许多细微孔洞，增大对氢的吸收和溶解能力；铝合金在氢氧化钠槽液中进行表面处理时，塑性变形层吸收氢。

⑥ 氧化膜中的水合物。铝合金经 $\text{NaOH} + \text{HNO}_3$ 处理后，表面形成一层质地疏松的氧化膜，厚度仅为 $100\sim 1000\text{nm}$ ，含水量达 $0.7\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。据计算， $1\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的水在电弧作用下可形成 0.16×10^{-6} 的氢，大大增加熔池内的氢含量。

⑦ 接触性粘附。铝合金构件进入焊接前经过移动、检测、修饰、擦拭、装夹、定位对中等多道工序,若工艺规程不合理或操作不当,手或工具接触坡口,使坡口受到汗迹、油脂或纤维等碳氢化合物的污染。

⑧ 焊丝。焊丝清理不干净对焊缝气孔有显著影响;对焊丝内部氢含量的限制和母材相同。

⑨ 母材中含有大量易挥发的合金元素。

防止焊缝气孔的工艺措施如下:焊接过程中严格控制熔池氢的来源是减少或者消除焊缝气孔的关键。要求不高时,可采用化学处理方法清理工件和焊材,对焊缝质量要求较高时,应选用机械方法处理。焊接时,周围环境的湿度应控制在 60% ~ 65%, 温度 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。选用合适的焊接参数或采用扫描电子束焊或重熔焊缝,有利于熔池中气泡溢出。

(4) 热影响区性能下降 对于非热处理强化铝合金,在焊接接头附近温度大于再结晶温度的区域,发生再结晶,使得冷作硬化作用消失,致使热影响区软化;焊缝金属是铸造组织,用同质焊丝焊接,焊缝金属强度低于母材。对于热处理强化铝合金,在焊接热影响区中温度高于时效处理温度的区域,会发生过时效,而导致强度下降。焊接热输入越大,性能降低的程度越大。

防止热影响区性能下降的工艺措施有以下几种:

1) 焊后热处理:在焊后通过热处理的方法使在焊接过程中减弱或消失的热处理强化效果得到一定恢复。一般采用与母材本身相同的热处理工艺参数。焊后热处理适合于小型焊件,但易造成较大变形。

2) 局部补强:指局部增加焊接部位的母材厚度,使接头承载能力达到设计标准,适合于中大型构件。

3) 碾压:碾压是指在焊接过程中对焊缝及近缝区实施碾压,改善接头性能。

2. 电子束焊工艺

铝合金电子束焊容易产生如下工艺性缺陷:未熔合、未焊透、咬边、焊瘤、飞溅、凹陷等。主要影响因素有接头设计、坡口间隙、焊接参数、电子束与接缝的对中、接头清理不干净。

(1) 未熔合 指焊缝和母材金属间未完全熔化结合。防止产生未熔合的工艺措施有选用合适的焊接参数;清除坡口氧化膜;电子束与接缝对中;电子束扫描。

(2) 未焊透 指接缝根部未完全熔化。防止产生未焊透的工艺措施有采用合适接头设计;选用合适的焊接参数(提高电子束功率密度);电子束与焊缝的对中。

(3) 咬边 指在焊趾或焊根处形成的沟槽。防止咬边的工艺措施有:避免立向焊或横焊;调整焊接参数(电子束功率、焊接速度、送丝速度);控制电子束角度和运行速度,取消摆动;用较大直径电子束重熔焊缝。

(4) 焊瘤 指焊缝金属外溢或焊根赘瘤。防止焊瘤的工艺措施有减少卷边高度;减小送丝速度或者提高焊接速度;控制接头的制备质量,清理杂物;复查焊件材料中含气量;采用散焦束或者电子束扫描重熔焊缝。

(5) 凹陷 指焊缝表面产生下凹。防止表面凹陷的工艺措施有降低电子束功率;加填充金属或提高送丝速度以形成余高;电子束焊缝重熔。

(6) 飞溅 指熔化金属溅射至焊缝附近区域 防止飞溅的工艺措施有复检材料中的气体和夹杂含量;降低电子束功率或聚焦电流;提高接头加工质量,清理杂物;电子束与接缝对中。

2.3.7 其他金属的焊接

1. 镁合金

镁合金焊接和铝合金焊接出现的问题相似。主要有以下方面:

1) 粗晶。焊缝及近缝区金属容易产生过热和晶粒长大。

2) 氧化与蒸发。镁极易氧化, 形成氧化镁, 在熔池中形成细小片状夹渣, 高温下, 镁与氮化氢生成镁的氮化物, 使焊接接头性能降低。

3) 热应力。镁及镁合金热膨胀系数大, 焊接过程中产生较大的焊接应力和变形。

4) 焊接裂纹。镁与一些合金元素 (Al、Ni、Cu) 会形成低熔点共晶体, 导致焊缝产生热裂纹。

5) 由于合金中镁和锌在真空的蒸气压很高, 易于产生气孔, 当镁合金中锌的质量分数大于1%时, 甚至难于形成致密的焊缝; 镁合金表层吸附气体, 焊缝容易产生氢气孔。

镁合金电子束焊主要问题如下:

1) 烧穿。液体表面张力低, 熔化金属易流失, 导致烧穿, 提高焊接速度可以防止烧穿。

2) 焊缝气孔。降低焊接速度或电子束扫描焊接有助于消除气孔; 防止烧穿和防止气孔的措施相互矛盾, 致使镁合金电子束焊的焊接参数范围很窄。

3) 高压放电。镁合金易挥发, 金属蒸气易引发高压放电。

2. 铜和铜合金

(1) 铜和铜合金焊接工艺特点 主要特点如下:

1) 铜的热导率大, 纯铜约为低碳钢的6~8倍, 散热快, 易造成焊接热量流失, 必须采用大功率大热输入的热源进行焊接。

2) 铜、铜合金中合金元素极易氧化, 铜与氧结合生成氧化铜 Cu_2O , 铜锌合金中的锌易烧损氧化形成 ZnO ; 导致焊缝的化学成分变化, 降低接头性能; 铝青铜在焊接过程中, 铝极易氧化生成高熔点的氧化铝, 在焊缝中形成夹渣。

3) 铜合金中的许多合金元素、杂质及其化合物与铜可以形成低熔点共晶, 焊缝容易产生热裂纹。

4) 铜合金焊缝容易形成气孔。

5) 铜的热膨胀系数大, 焊接时产生较大的热应力, 焊接热影响区宽, 焊接变形严重。

6) 铜及铜合金液体流动性好, 焊缝成形难于控制。

(2) 铜合金焊接主要问题 主要问题如下:

1) 热裂纹倾向: 铜与很多金属元素、杂质、化合物可以形成低熔点共晶, $\text{Cu}_2\text{O} + \text{Cu}$ (1064°C); $\text{Cu} + \text{Bi}$ (270°C); $\text{Cu}_2\text{S} + \text{Cu}$ (1067°C); $\text{Cu} + \text{Pb}$ (326°C); 低熔点共晶分布于晶界, 造成热脆性, 当接头存在较大应力时, 易于形成热裂纹。

防止措施: 控制材料中合金元素含量; 焊缝金属中加入 Si、Mn、P 等合金元素; 降低接头拘束度。

2) 焊接气孔: 铜在液态条件下可以溶解大量氢、氮气等, 由于铜散热快, 熔池存在时间短, 凝固过程中过饱和溶解的气体来不及逸出, 形成气孔。

① 铜与铜合金液、固态温度下氢 (氮) 的溶解度差别极大, 结晶时氢 (氮) 气逸出形成气孔。

② 熔池中氢与 Cu_2O 反应生成水蒸气; 或 CO 与 Cu_2O 反应生成 CO_2 ; 结晶时气体逸出形成气孔。

③ 熔池中低熔点元素 Zn、P 挥发形成气孔。

防止气孔工艺措施: 减少氢氧含量, 电弧保护, 防止氮气进入熔池; 填充金属尽量减少低熔点合金元素; 采用含 Mn、Si、Al、Ti 强脱氧剂元素的填充金属; 高温预热, 焊后缓冷延长熔池存在时间; 磁力搅拌熔池。

3) 接头性能弱化, 主要表现为:

① 焊接热循环下焊缝晶粒长大、杂质增加、合金元素烧损、蒸发, 导致接头性能变化。

② 杂质、合金元素进入焊缝,致使接头导电性下降;HAZ 晶粒粗大、晶界存在杂质、低熔共晶,致使接头塑性韧性下降;焊接时 Zn、Mn、Ni、Al、Sn 元素烧损使某些铜合金的耐腐蚀性降低。

防止性能弱化措施:控制热输入,防止过热;限制填充金属中杂质元素含量;向焊缝添加烧损的合金元素。

(3) 电子束焊工艺问题 电子束热量集中,能量密度高,对于厚 40mm 的铜板,采用电子束焊所需要的热输入是自动埋弧焊所需热输入的 $1/5 \sim 1/7$ 。焊缝横断面积是其 $1/25 \sim 1/30$ 。

焊接铜合金可能发生的主要缺陷是气孔。对于厚度为 $1 \sim 2\text{mm}$ 的薄铜板,焊缝中不易产生气孔。对于厚度为 $2 \sim 4\text{mm}$ 的铜板,焊接速度应低于 34cm/min ,可以防止产生气孔。厚度大于 4mm 时,焊接速度过慢会使液体金属流失,焊缝成形变差。增加装配间隙、焊前预热和重复施焊都是减少焊缝气孔的有效措施。

为了减少金属的蒸发,对厚度为 $1 \sim 2\text{mm}$ 的铜板,电子束焦点应处在工件表面以上、对厚度大于 15mm 时,可将电子枪水平放置进行横焊。

3. 难熔金属

钨、钼、铌、钽、钨等属难熔金属。钨及其合金焊接时,对杂质敏感,使延性降低;接头加工制备和清洗是非常重要的,清洗后应进行除气处理,在高于 $1.33 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 的真空度下,将工件加热到 1370K ,保温 1h ,随炉冷却。由于凝固和再结晶时易形成粗大的晶粒,使塑性降低;焊接时宜采用小热输入,减少热输入,防止生成粗大的组织;接头设计应尽量避免应力集中,防止产生裂纹。预热是防止钨接头冷裂纹的有效措施,预热温度可选为 $700 \sim 1000\text{K}$,对于粉末冶金钨的焊接,速度低于 50cm/min 时才不需进行预热。对 W-25Re 合金,预热可提高焊接速度 $25 \sim 170\text{cm/min}$,并降低热裂倾向。钼非常活泼,应在 $1.33 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 以上的高真空中进行焊接。接头制备和清洗是至关重要的;焊后退火可提高接头抗冷裂和延迟破坏的能力。退火条件是在 $1023 \sim 1128\text{K}$ 的温度下保温 1h ,随炉冷却。焊接的热输入与同厚度的钢相近。铌的电子束焊也应在优于 $1.33 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 的高真空中进行。铌合金焊缝中常见的缺陷是气孔和裂纹。采用细电子束进行焊接不易产生裂纹。用散焦电子束对接缝进行预热,有清理和除气作用,有利于消除气孔。钒、铌、钽高温停留时间长,焊缝及热影响区金属晶粒长大严重,脆性转变温度提高;含有较多合金元素时,对焊接热循环更加敏感,焊缝及热影响区析出第二相,使塑性降低;合金杂质含量高,焊缝可能出现气孔、裂纹;减小束斑尺寸,可降低裂纹倾向;散焦扫描,可防止气孔发生。Mo 易氧化,与氧、氮能形成氧化物、氮化物,在晶界形成连续的薄膜,塑性严重降低;在热应力下,产生开裂。应在高真空(压力 $\leq 1.33 \times 10^{-2}\text{Pa}$)条件下进行焊接,为了细化晶粒,改善晶界的薄膜分布状态,防止过度脆化,应尽可能降低热输入,减小热影响区宽度,降低接头应力。钨合金中加入铝、钛、钨、钼、钽、碳、硼、铌或钽,能够抑制氧、氮和碳的有害作用,提高焊缝韧性。钢的焊缝中常见的缺陷是气孔和裂纹。焊前严格清洗接缝和工件预热有利于消除气孔。采用细电子束和加快焊接速度有利于消除裂纹。

4. 异种金属

异种金属焊接,由于两种金属的晶体结构、理化参数不同或两者的化学成分、微观组织差异,焊接性显著变差。焊接时需要考虑二者的冶金相容性,采取相应的工艺或冶金措施,促使在焊接区内发生有利于两者结合的冶金过程,以期获得性能满意的焊接接头。

异种金属焊接焊缝金属的成分、组织和性能主要取决于两种材料及填充金属在焊缝金属中的比例,两种材料在焊缝中比例与接头形式和焊接方法以及焊接参数有关。因此异种金属的焊接性除了与被焊金属本身的物理化学特性有关之外,在很大程度上取决于焊接方法和焊接参数。异种金属焊接的主要工艺特点有以下方面:

1) 异种金属焊接由于二者的物理化学性能差异,焊接接头金属容易产生不连续、不完整和不均匀的缺陷,如裂纹、气孔、夹杂物、接头性能恶化(硬化、软化、脆化)等以及耐蚀性、疲劳强度下降等。

2) 异种金属焊接,在形成冶金接头中形成成分、组织和性能与被焊金属完全不同的新的多元合金。当彼此可以形成固熔体的时,两者具有良好的冶金相容性,其焊接性比较好。当异种金属的焊接接头中容易生成金属间化合物时,其冶金相容性变差,通常焊接性也差。两种金属冶金相容性不好,不可避免在焊缝中会生成对接头性能不利的组织如:低熔共晶体或脆性组织,导致接头塑性降低,增加裂纹敏感性。

3) 异种金属焊接接头中组织和成分的不均匀性与两种材料的合金成分和焊接参数有关。焊接接头中成分和组织的不均匀性,不仅会降低焊接接头的力学性能,而且还导致焊接接头的化学和电化学性的不均匀,在腐蚀环境下引起局部腐蚀以及在焊接内应力作用下导致应力腐蚀开裂。

对于冶金相容性差的异种金属焊接,一般通过添加填充金属,或在两者的结合面中预制一个隔离层或过渡层材料,再进行焊接,用以阻挡或减少母材金属成分的向焊缝金属中的溶解、扩散,避免生成金属间化合物、低熔共晶组织或其他恶化接头性能的组织,改善焊接性;有时直接通过电子束偏移,控制两种金属在焊缝金属的比例,从而避免在焊缝中生成金属间化合物或其他恶化接头性能的组织,降低裂纹敏感性,以改善焊接性。表4-2-1为异种金属间的焊接性。

表4-2-1 异种金属间的焊接性

	Ag	Al	Au	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Nb	Ni	Pb	Pt	Re	Sn	Ta	Ti	V	W	Zr
Ag 银		C	S	X	C	D	C	C	D	X	C	D	N	C	C	S	D	C	X	C	D	D	X
Al 铝	C		X	C	X	X	X	C	X	C	X	X	X	X	C	X	N	C	X	X	X	X	X
Au 金	S	X		X	X	C	D	S	C	X	X	C	N	S	X	X	X	X	X	X	D	N	X
Be 铍	X	C	X		N	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	D	D	X	X	X	X
Cd 镉	C	X	X	N		D	D	X	D	S	D	N	N	D	C	X	N	C	N	X	N	X	D
Co 钴	D	X	C	X	D		C	C	C	X	C	X	X	S	C	S	S	X	X	X	X	X	X
Cr 铬	C	X	D	X	D	C		C	C	X	C	S	X	C	C	C	S	C	X	S	D	S	X
Cu 铜	C	C	S	X	X	C	C		C	X	S	D	C	S	C	S	D	C	D	X	D	D	X
Fe 铁	D	X	C	X	D	C	C	C		D	C	C	X	C	C	S	X	X	X	X	S	X	X
Mg 镁	X	C	X	X	S	X	X	X	D		X	D	N	X	X	X	N	X	N	D	X	D	D
Mn 锰	C	X	X	X	D	C	C	S	C	X		D	X	C	C	X	N	X	X	X	X	D	X
Mo 钼	D	X	C	X	N	X	S	D	C	D	D		C	X	D	C	X	D	S	S	S	S	X
Nb 铌	N	X	N	X	N	X	X	C	X	N	X	S		X	N	X	X	X	S	S	S	S	C
Ni 镍	C	X	S	X	D	S	C	S	C	X		X	X		C	S	D	X	X	X	X	X	X
Pb 铅	C	C	X	N	C	C	C	C	C	X	C	D	N	C		X	X	C	N	X	N	D	X
Pt 铂	S	X	S	X	X	S	C	S	D	X	X	C	X	S	X		C	X	X	X	X	S	X
Re 铼	D	N	N	X	N	S	S	D	X	N	N	X	X	D	N	C		D	X	X	D	X	X
Sn 锡	C	C	X	D	C	X	C	C	X	X	X	D	X	X	C	X	D		X	X	X	D	X
Ta 钽	X	X	N	D	N	X	X	D	X	N	X	S	S	X	N	X	X	X		S	X	S	C
Ti 钛	C	X	X	X	X	X	S	X	X	D	X	S	S	X	X	X	X	X	S		S	C	S
V 钒	D	X	D	X	N	X	D	D	S	N	X	S	S	X	N	X	D	X	X	S		S	X
W 钨	D	X	N	X	N	X	S	D	X	D	D	S	S	X	D	S	X	D	S	C	S		X
Zr 锆	X	X	X	X	D	X	X	X	X	D	X	X	S	X	X	X	X	X	C	S	C	X	

注: S—两种材料间存在完全固溶,可焊性佳; C—两种材料间会出现复合组织,尚可焊; X—两种材料间会形成金属间相,不可焊; D—尚未做大量焊接研究,问题不明; N—尚无焊接案例。

2.4 电子束焊焊接设备

2.4.1 电子束焊机的系统结构

图 4-2-21 所示为典型的真空电子束焊机，主要包括主机、高压油箱、控制柜、真空系统及监控系统几个部分。

(1) 主机 包括电子枪、焊接真空室、工件（或电子枪）传动系统、检测监控系统、操作控制台。

(2) 高压油箱 内置电子枪阳极高压电源、阴极加热电源、栅偏电压直流电源等。由于电子枪加速电压高达 60 ~ 150kV，电子枪阳极与阴极灯丝、栅极偏压电源有公共连接点，系统对地皆处于高电压，必须置于绝缘性能良好的变压器油中。

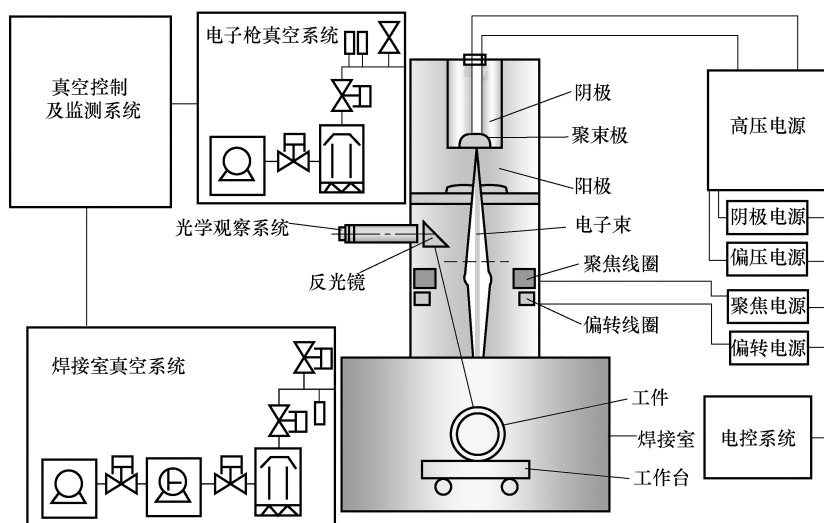


图 4-2-21 电子束焊机结构框图

(3) 控制柜 内置高压电源控制、阴极加热电源控制、束流（栅偏压）控制、束流聚焦控制、束流偏转扫描控制以及真空控制元件和工件传动控制装置的电气控制等。

(4) 电子束焊机 配有两套相互独立的真空系统，一套用于电子枪抽气，一套用于焊接室抽气；电子枪真空系统包括机械泵、分子泵、闸阀、真空计等；焊接室真空系统包括机械泵、罗茨泵、扩散泵、闸阀、真空计等；电子枪上装有隔离阀，打开焊接室更换工件时，焊接室充气，仍可使电子枪保持高真空状态；真空系统配置灵敏的真空测量与控制装置，对两路独立的真空系统进行实时监控，同时具有完善的自保护能力，如在各种状态下，能完成真空系统中的泵、阀等自动切换和联锁保护。

(5) 电子枪结构 电子枪是电子束焊机的核心装置，有以下四个主要功能：

- 1) 阴极发射电子（热发射、场致发射）。
- 2) 阴极—阳极间施加高压电场，将阴极发射的电子加速至极高的速度（0.3 ~ 0.7 倍光速）。
- 3) 栅偏负压控制电子束流的大小。
- 4) 静电透镜和电磁透镜对电子束进行聚焦，形成高能密度束流。
- 5) 偏转线圈磁场使束流产生偏转。

电子枪结构原理如图 4-2-22 所示，三极电子枪由阴极（电子发射）、栅极（栅偏电压）和阳极（加速电压）组成。阴极与阳极之间施加高压加速电场，加速电压电源的负极连接电子枪阴极，正极连接电子枪的阳极。阳极与设备外壳相连，并严格接地，接地电阻小于 4Ω 。加速电压由三相工频交流整流、滤波、中频（或高频）逆变，变压器升压，再经全波整流得到 $60 \sim 150\text{kV}$ 以上高压。阴极电源普遍采用逆变电源，逆变产生的 $1 \sim 10\text{kHz}$ 中频交流经变压器降压、整流、滤波，输出 $20 \sim 30\text{V}$ 直流电压用于阴极灯丝加热。灯丝电源负极与加速电压的负极相连。阳极、阴极之间有一个栅偏压控制极，栅偏电压也采用逆变直流电源， 15kHz 中频交流经整流滤波获得 $1000 \sim 1500\text{V}$ 直流电源，栅极相对于阴极呈负偏压，栅偏电源负极接栅极，正极接阴极。调节栅极负电位的高低、或改变栅偏电极形状和位置可以调节电子束流的大小。为了防止高压的击穿、电子束流的散射和能量的损耗，电子枪室的真空度需保持在 $5 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 以上。

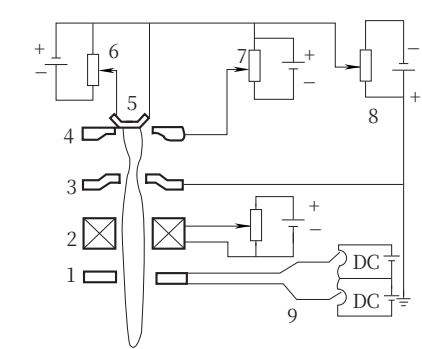


图 4-2-22 电子枪结构原理

1—偏转线圈 2—聚焦线圈 3—阳极
4—栅极 5—灯丝 6—灯丝电源 7—栅偏电源
8—高压电源 9—扫描电源

2.4.2 电子束焊机的分类

电子束焊机按加速电压或真空环境进行划分，可分成三类，见表 4-2-2。

表 4-2-2 电子束焊机类型

环境压力	高真空	低真空（局部真空）	非真空
技术特征	1. 真空度 $10^{-4} \sim 10^{-2}\text{Pa}$ 2. 环境氧含量低,有效防止金属元素的氧化和烧损 3. 焊件尺寸受真空室尺寸限制 4. 适用于活性金属、难熔金属、真空密封件的焊接	1. 真空度 $10^{-1} \sim 10\text{Pa}$ 2. 电子束具有高真空时束流密度和功率密度的特点 3. 低真空或局部真空焊,抽真空时间短,生产率高 4. 低真空适用于大批量零件的焊接,局部真空则可用于大型焊件的焊接	1. 大气压 $7\text{Pa} \sim 15\text{Pa}$ 2. 加速电压 $\geq 120\text{kV}$ 3. 无需大型真空室,焊接熔池采用惰性气体保护 4. 电子枪最大的工作距离 $20 \sim 50\text{mm}$ 5. 焊缝深宽比 $5:1$ 6. 工作环境需要进行 X 射线防护
加速电压	高压型	中压型	低压型
技术特征	1. 加速电压 $60 \sim 175\text{kV}$ 2. 定枪或动枪 3. 最小束斑直径 $\leq 0.4\text{mm}$ 4. 工作环境要进行 X 射线防护	1. 加速电压 $40 \sim 60\text{kV}$ 2. 定枪或动枪 3. 最小束斑直径 $\approx 0.4\text{mm}$ 4. X 射线防护通过真空室结构设计解决	1. 加速电压 40kV 2. 定枪或动枪 3. 最小束斑直径 $\geq 0.75\text{mm}$ 4. X 射线防护通过真空室结构设计解决

注：动枪式结构，焊接过程中工件不动，电子枪或安装在工作室外或工作室内，可以平移或转动；定枪式结构，电子枪安装在工作室外，固定不动，焊接过程中通过传动系统驱动工件运动，进行焊接。

2.4.3 电子束扫描控制系统

1. 基于波形发生器的扫描控制系统

普通的波形发生器只能产生的几种固定的波形：三角形波、矩形波、正弦波等函数波形等几种电子束扫描图形。

2. 基于 LabVIEW 虚拟仪器扫描控制系统

基于虚拟仪器的电子束扫描控制系统由工控机、可编程序控制器、功率放大器、扫描偏转线圈、NI 数据采集卡、AD/DA 转换器及 LabVIEW 虚拟仪器的信号产生、功率放大、驱动系统等组成。利用 LabVIEW 软件的虚拟仪器可编辑产生“任意波形”的扫描轨迹。电子束可进行连续扫描

或断续扫描,点或线扫描,区域扫描等。图 4-2-23a 为点或线扫描图形;图 4-2-23b 为不连续扫描图形;图 4-2-23c 为连续扫描图形和电子束运行轨迹。

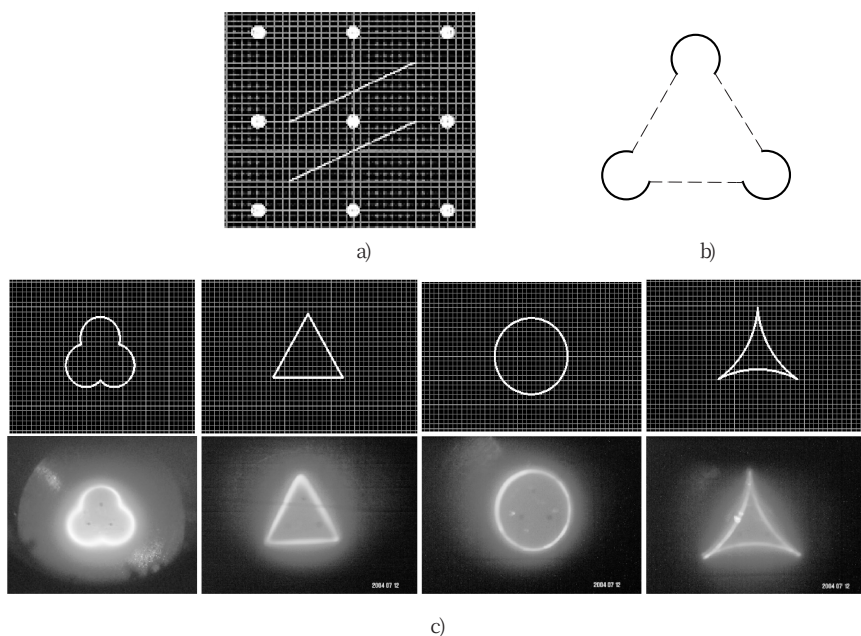


图 4-2-23 基于虚拟仪器的电子束扫描控制

a) 点、线扫描 b) 不连续扫描 c) 连续扫描图形和电子束运行轨迹

上一编辑扫描图形 下一电子束运行轨迹照片

2.4.4 电子束焊的焊接过程控制

电子束焊机控制系统包括加速电压控制、阴极加热电源控制、束流控制、聚焦电源控制以及束流偏转扫描控制、电子枪或工件传动系统控制以及低压电器、控制电路、功率放大器、PLC 逻辑控制器、工业控制计算机等。真空抽气控制系统包括电子枪抽气系统、工作室抽气系统以及真空检测、闸阀控制装置,操作台则设置电子束焊参数操作旋钮、开关,参数温度指示仪表;焊缝对中调节工业电视监控器 CRT、焊接过程控制触摸屏等。工业电视机摄像头和光学观察镜、红外温度测量仪安装在电子枪、真空室的观察孔上,用于焊接过程中监控电子束斑与焊接接头的相对位置、电子束焦点、焊缝成形以及工件加热位置的温度控制。

电子束焊在密封的真空环境下进行,焊接过程中不能实时地进行人工干预调节,焊接需要实现高度自动化控制。电子束焊过程控制需要解决以下几大任务:

- 1) 电子束功率参数(高压、束流、聚焦、扫描图形、方式)设置和调节。
- 2) 焊缝设置对中,焊缝起始点、终点位置,坐标原点设置与检测。
- 3) 焊接工作台运动控制(焊缝跟踪、轨迹、速度、方向控制)。
- 4) 真空度检测与控制。
- 5) 工件焊接温度检测与控制。
- 6) 焊接过程顺序控制等。

普通的电子束焊机通常以 PLC 为核心以及真空检测传感器(冷规、热偶)、电磁阀、电位器、行程开关、指令开关等辅助器件即可构建焊接过程控制系统。鉴于焊接过程在线监测,数据可实时显示、存储、打印,历史数据可查阅、过程控制程序可再开发等现代工业生产质量管理规程以及控

制系统功能可扩展, 系统软件可升级等计算机控制技术要求; 新一代电子束焊机通常以工业控制计算机 (或 CNC) + PLC + 辅助器件构建焊接过程控制系统。在计算机 + PLC 控制模式下, 计算机 PC 通过 I/O 接口检测监控电子束焊机系统状态信息, 通过 RS232 或 RS485 接口与 PLC 之间进行通信, 传输指令、接收信息, 实现对焊接过程的管理与实时控制。需要手动时, 通过键盘设定工作台运动速度、运动方式, 焊接过程由 PLC 控制; 自动控制时, PC 负责人机交互界面的管理和控制系统的实时监控等工作 (如键盘和鼠标的管理、系统状态的监测、显示, 工件运动路径规划、控制指令的发送等); PLC 完成电子束焊过程细节实施 (包括焊接启动、停止指令开关、行程开关信号检测, 电子枪、焊接室抽真空、充气开关指令检测, 电子枪、焊接室真空度状态检测, 工件位置、运行方向指示检测, 运动速度给定值, 高压、束流给定值以及上升、下降斜率给定信号设定, 泵、阀、伺服电动机运动控制等)。

2.5 电子束焊的应用

20 世纪 60 年代起, 中国科研工作者开始对钛合金、高强钢、不锈钢、铝合金、高温合金等各种金属材料的电子束焊进行了系统地研究。至今, 电子束焊在航空、航天、核能、武器、电子、汽车、机械制造等许多工业领域已经获得了广泛应用。世界宇航工业中各种火箭、卫星、飞船、星球车、空间站的结构件: 飞机翼盒 (钛合金)、机翼大梁 (钛合金)、起落架 (高强钢 300M); 飞机发动机部件零件: 燃烧室部件、发动机风扇、转子 (钛合金)、金属网过滤器、发动机波纹管组合件; 火箭发动机部件: 压气机鼓筒、风扇鼓筒 (钛合金、镍基合金); 涡轮机匣、支撑环; 火焰筒内环、外壁 (镍基合金); 雷达波导、各种仪器、电子传感器零件; 在汽车工业中, 汽车结构件: 后桥、变截面梁、轴; 发动机零部件: 液力变矩器涡轮、泵轮、齿轮等; 在能源工业中, 核电站反应堆内构件筒体、汽轮机叶片等都成功地使用电子束焊制造。

2.5.1 齿轮组合件的焊接

组合齿轮焊接结构如图 4-2-24 所示, 材料为 20CrMnTi 低合金钢。大型推进齿轮焊接结构如图 4-2-25 所示, 材料为 18CrNi4A。

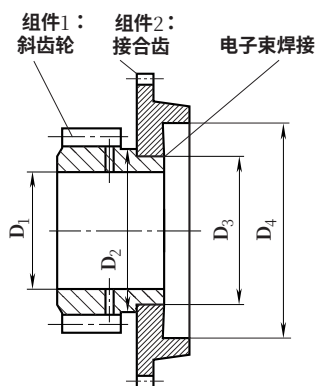


图 4-2-24 组合齿轮焊接结构

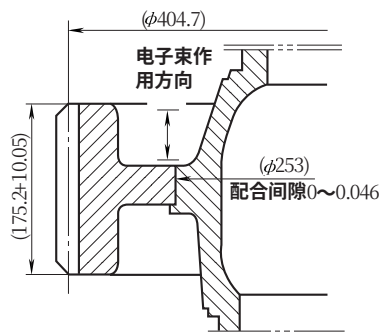


图 4-2-25 大型推进齿轮焊接结构

1. 主要问题

1) 焊偏。导致根部未熔合或未焊透; 产生的原因是: 夹具或电子枪运行机构的精度偏差; 电子束与接缝对中偏差; 齿轮自身的剩磁或者电子束焊过程中形成的热电磁效应, 导致电子束偏离接缝, 形成根部未熔合缺陷。

2) 合金元素局部偏析。晶界产生低熔点共晶组织，在焊接热应力作用下形成热裂纹。

3) 含碳量高，形成淬硬组织；焊缝根部未熔合，导致应力集中，接头焊接应力大，引起冷裂纹；

2. 齿轮焊接工艺

1) 齿轮焊接接头采用环对接、角接、套接等几种形式。

2) 焊接齿轮的精度依赖于零件的加工、装配、定位精度；齿轮组件的接缝面精密加工，不开坡口，去除毛刺，接头装配一般采用压配，不留间隙，配合长度公差要求不大于 0.05mm，以保证压装后两组件在焊接端面上平齐。控制接头配合的精度，装配以内孔（或内齿环）为基准，压装后齿轮组合件同轴度控制在 0.04mm，确保焊后外齿对内孔跳动量不大于 0.10mm。

3) 需要设计制造专用夹具，保证齿轮的装配定位精度和焊缝对中。

4) 齿轮两组件焊前应严格进行清理、去除氧化物、油脂等。

5) 焊前预热，或采用扫描电子束焊，防止焊接裂纹。

6) 齿轮组合件焊后做整体热处理或表面渗碳处理，降低焊接残余应力，提高表面硬度。

7) 对工件和夹具进行退磁处理，消除剩磁场干扰。

8) 热电磁效应引起的焊偏造成的未熔合，可通过电子束反向补差对中施焊加以消除。

大型推进齿轮直径 $\phi 404.7\text{mm}$ ，采用锁底环形对接接头，齿环直径 $\phi 253\text{mm}$ 。材料：18CrNi4A 低合金钢。其电子束焊焊接参数见表 4-2-3。

表 4-2-3 大型推进齿轮电子束焊焊接参数

加速电压/kV	电子束流/mA	焊接速度/(mm/s)	工作距离/mm	工作真空度/Pa	聚焦位置	扫描频率/Hz
60	275 ~ 258	5	206	3×10^{-2}	表面下 20mm	300

2.5.2 汽车后桥壳的焊接

斯太尔汽车后桥壳中段与半轴的装焊结构如图 4-2-26 所示。桥壳中段材质为 Q345（16Mn），轴头材质为 30Mn2，状态是调质态；内部衬环采用 20 钢，对异种钢的焊接起一个过渡作用，减少焊缝下沉、咬边和焊接裂纹缺陷。

工艺试验在德国制造 EBW15/60-701 型真空电子束焊机上进行，焊机的加速电压为 60kV，焊室容积 701 L，最大焊接速度 50mm/s。

Q345（16Mn）钢碳当量为 0.41%，30Mn2 钢碳当量为 0.58%，30Mn2 钢的碳当量高，淬硬倾向大，对焊接冷裂纹敏感。对于 Q345（16Mn）和 30Mn2 异种钢焊接，采取了如下工艺措施：

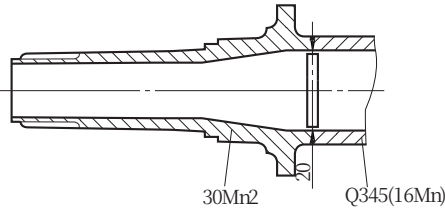


图 4-2-26 汽车后桥壳中段与半轴的装焊结构

1) 控制热输入，减小热影响区软化。

2) 采用焊前预热和焊后缓冷，以降低接头区的冷却速度，可减少冷裂纹的产生。预热温度 200 ~ 250℃。

3) 为了防止产生气孔，降低焊缝氢含量，焊前对焊接处进行严格清理，装配前用砂纸将氧化膜及锈迹打磨干净，露出金属光泽，用汽油洗去油污，最后用丙酮清洗干净，放入烘箱进行 200 ~ 250℃ 预热，保温待焊。

4) 真空电子束焊焊接参数：加速电压 60kV，电子束流 120mA，焊接速度 1.99mm/s，聚焦电流 488mA，真空度 $2 \times 10^{-2}\text{Pa}$ ；

焊接接头经解剖检验，焊缝中未发现气孔、夹渣；对焊缝进行外观检查以及超声波和 100% X 射线探伤，均未发现焊接裂纹；对焊接桥壳进行载荷为 18.75 t，重复 80 万次的疲劳试验，焊缝未

出现疲劳裂纹。

2.5.3 铝合金汽车驾驶舱横梁的焊接

汽车驾驶舱横梁是一种变截面方形梁，由两块硬铝板冲压成形，经组装、焊接而成，结构如图 4-2-27 所示。对横梁的焊接质量要求是：抗冲击强度高，焊后整体变形小。焊接技术难点：零件尺寸较大，焊缝不仅不在同一轴线上，而且不在同一平面上，因此焊接过程中，不同区域要求工件变换轴线，变换焦距进行焊接。采取的工艺措施是：焊接过程中，工件可以做二维平移或转动，实现电子束对焊缝的跟踪；接头装配间隙波动，则采用变焦或电子束扫描，以获得连续均匀一致的焊缝。

2.5.4 空间飞行器压力容器的焊接

空间飞行器推进系统的压力容器，用于推进剂的储存和供应。表面张力压力容器的工作原理如图 4-2-28 所示，在气口端施加一定的压力 p 将储箱内腔推进剂通过网片以一定的流量 Q 从液口端供应给发动机，由于受到推进剂在网片表面形成的张力阻隔，气体不能进入发动机。

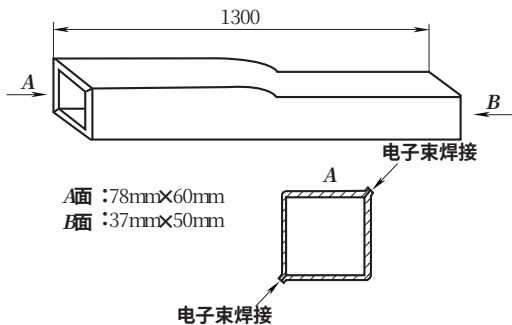


图 4-2-27 汽车驾驶舱横梁电子束焊

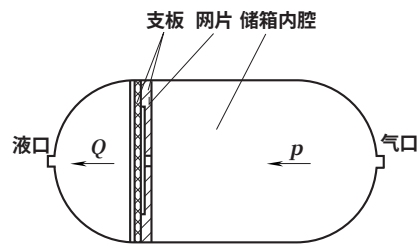


图 4-2-28 表面张力压力容器的工作原理

- (1) 储箱主体结构 采用钛合金 (TC4) 材料，厚度 3.5mm，焊缝技术指标：达到航天工业焊接标准一级焊缝。
- (2) TC4 钛合金焊接的主要问题 气孔、焊缝脆化、焊接加热时晶粒的粗化以及冷却时脆性相的形成等。
- (3) 电子束焊工艺 主要工艺：压力容器的焊缝不开坡口；焊前严格清理焊缝区域，用丙酮清洗油脂、干燥；其电子束焊的焊接参数见表 4-2-4。

表 4-2-4 压力容器电子束焊的焊接参数

加速电压/kV	聚焦电流/mA	束流/mA	焊接速度/(mm/s)	真空度/Pa
60	586	12	16	10^{-3}

压力容器焊缝经无损检测，没有发现裂纹、未焊透和夹渣、气孔等超标缺陷，强度达到技术指标；焊缝呈延性断裂。

2.5.5 导弹发射架的焊接

导弹发射架采用铸造铝合金结构，材料 ZL114A，厚度 8mm，热处理状态为 T6，焊接接头为平板对接。焊接设备为 KS190-G150KM 型真空电子束焊机，加速电压 150kV，功率 15kW。

- (1) 焊接工艺措施 主要工艺措施如下：焊前采用机械方法对焊件进行整体清理，再对焊缝对接面及周围 20mm 范围内进行打磨，直至露出金属光泽。对工装上靠近焊缝的部位进行相应清

理，用酒精清洗工件表面油脂；

(2) 焊接参数的选择 电子束焊的焊接参数包括加速电压、聚焦电流、电子束流、焊接速度和工作距离等。为了防止铸铝焊接接头强度下降，选用较高的加速电压；为了减小热影响区宽度并与加速电压匹配，选择较小的电子束流；焊接速度较低时，接头区各点的热循环时间较长，对铸铝的热作用较长，易引起接头强度弱化，因此选择较高的焊接速度；为有利于熔池内气体的逸出，采用一定频率和波形的电子束流进行扫描焊接，以实现对接熔池的搅拌。优化的电子束焊焊接参数见表 4-2-5。

表 4-2-5 ZL114A 铝合金优化的电子束焊焊接参数

加速电压/kV	聚焦电流/mA	电子束流/mA	焊接速度/(cm/min)
120 ~ 145	1850 ~ 2050	16 ~ 25	70 ~ 100

试件焊缝外观均匀，经 X 射线检查，电子束焊焊缝内未见尺寸超标的气孔；力学性能测试，焊接接头抗拉强度 263MPa，达到基体强度的 90% 以上，断后伸长率为 20%，断裂在熔合线部位，有明显的缩颈；焊接质量符合航天相关焊接标准规定。

2.5.6 动力舱段壳体的焊接

动力舱段由前连接环、筒体、后连接环、加强肋和固定片等 13 个零件组成，其结构示意图如图 4-2-29 所示。动力舱段均采用时效不锈钢加工制造，其中前后连接环采用棒材车削加工，加强肋和固定片用板材机加工，筒体则用管材通过强力旋压制造。

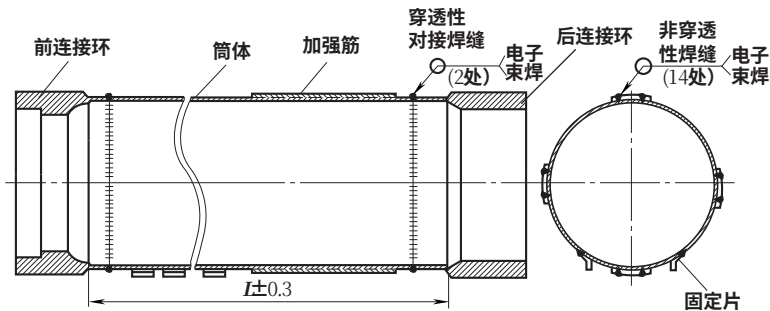


图 4-2-29 动力舱段壳体的结构示意图

(1) 主要焊接难点

1) 时效不锈钢焊接时，在热影响区中会出现一个软化区域，其温度范围为 600 ~ 750℃，组织为在马氏体基体上分布有弥散的奥氏体，而且奥氏体的数量会随焊接热输入的增大而增加。由于逆转奥氏体组织不能通过随后的时效而硬化，于是接头强度和硬度降低。

2) 尺寸精度要求高。动力舱前、后连接环与筒体之间有 2 条对接环焊缝；筒身上有 8 条平行的加强肋和 6 条固定片搭接焊缝；动力舱壳体的焊缝总长高达 3000mm；前、后连接环与筒体之间对接环缝，装焊错边量 ≤ 0.15mm；4 个加强肋相对于动力舱筒体周向 0°（360°）、90°、180°和 270°对称分布，角度误差 ± 10'；筒体与加强肋和固定片的搭接焊缝，电子束必须穿过加强肋和固定片，在筒体上的熔化深度分别为筒体壁厚的 60% ~ 100% 和 25% ~ 37.5%，在界面处的焊缝宽度分别为筒体厚度的 δ + 0.4mm 和 (0.5 ± 0.2) mm；焊后动力舱壳体的椭圆度控制在 0.46mm 之内；动力舱的长度 L 尺寸精度控制在 ± 0.3mm；加强肋对称中心线与筒体轴线平行。动力舱段壳体的电子束焊技术要求见表 4-2-6。

3) 壳体的焊接接头力学性能指标高。设计时将穿透性的圆周对接环焊缝定为航天部标准 I 级焊缝，而加强肋焊缝和固定片焊缝等非穿透性的搭接焊缝定为航天部标准 II 级焊缝。

表 4-2-6 动力舱段壳体的电子束焊技术要求

项 目	技术要求
焊接保证长度/mm	$L \pm 0.3$
加强肋处筒体圆度/mm	0.46
两吊挂对称度/mm	0.5
加强筋对称中心周向角度(相对于前连接环基准)	$0^{\circ} \pm 10'$ 、 $90^{\circ} \pm 10'$ 、 $180^{\circ} \pm 10'$ 、 $270^{\circ} \pm 10'$
两固定片对称度/mm	0.5

4) 焊接变形控制难。动力舱段筒体通过强力旋压、轧制而成,存在较大的加工应力。焊接又是一个局部快速加热和冷却的过程,必然产生焊接残余应力和变形。其次,动力舱是一个薄壁结构件,其刚度低,易变形。动力舱段筒体上有 4 个加强肋与 6 个固定片 14 条纵向搭接缝和 2 条环焊缝,焊后必然会产生轴向和径向收缩,且收缩量的大小与材料的热膨胀系数,焊接热输入的大小,焊缝的数量、位置及分布密切相关,焊接变形控制是最大难题。

(2) 电子束焊焊接参数 由于时效不锈钢合金元素含量较多,成分复杂,为限制焊缝结晶过程中的晶粒长大,减少偏析,要求尽可能降低焊接热输入。但由于筒体是强力旋压件,其强度高,塑性低,应力大,过小的热输入有可能导致裂纹的产生。再者,熔池存在时间过短,焊接时产生的气体来不及逸出熔池表面就被凝固在焊缝中而形成气孔,因此焊接热输入的大小选择必须两者兼顾,在两者之间找到平衡点。而对于加强肋和固定片的非穿透性搭接焊缝,既要保证在圆筒上有一定熔深,又要保证界面处的焊缝宽度。

在 3LY-KI 型中压电子束焊机和 ZD150-15A 型高压电子束焊机上进行了焊接工艺试验,动力舱段壳体电子束焊焊接参数见表 4-2-7。

表 4-2-7 动力舱段壳体电子束焊焊接参数

焊接参数		加速电压/kV	聚焦电流/mA	电子束流/mA	焊接速度
焊缝					
前、后连接环环形焊缝	定位焊	60	793	7	1.56r/min
	封焊	60	793	9	1.56r/min
	焊接	60	795	24	1.56r/min
加强肋搭接焊缝		140	346	16	10mm/s
固定片搭接焊缝		140	373	3.2	5mm/s

注:定位焊时,圆周方向设 8 个焊点,对称焊接;定位焊缝长度 30mm;封焊时,焊缝深度 1/5 ~ 1/4 壁厚;焊接真空室真空度 3×10^{-2} Pa。

(3) 焊接夹具的设计及制造 动力舱段焊接技术关键是变形控制。为了保证动力舱段壳体装配焊接尺寸精度,设计制造了三种焊接夹具。

1) 前后连接环焊接夹具。在装配定位同时对筒体的圆度进行校正,使其与连接环的对接边的错位量在 0.1 mm 以内,再进行焊接。

2) 加强肋焊接夹具。设计了内部撑夹具和加强肋角度安装夹具。保证 4 个加强肋的轴向尺寸和周向分布的角度精度。

3) 固定片焊接夹具。利用夹具保证定位片与筒体的平行度和每两件固定片的对称度和轴向位置尺寸。

焊接夹具设计既要保证电子束焊过程的稳定性、连续性,又要保证电子束的可达性和操作的可视性;精度公差范围为焊接毛坯焊后尺寸精度公差范围的 1/3;动力舱段筒体毛坯各零件之间的相对位置精度均靠焊接夹具来保证,个别零件如筒体的椭圆度还靠夹具进行校正,4 个加强肋和 6 个固定片均带夹具进行焊接,焊后拆卸夹具。

(4) 质量控制措施 主要措施如下:

1) 接头清理。焊接之前,严格清除各零部件及焊接夹具上的油污、锈蚀及氧化皮等。零件表

面和焊接夹具用丙酮或无水酒精清洗干净。

2) 焊接夹具均采用由不锈钢材料制作, 无磁性, 若有剩磁, 应去磁, 使其磁感应强度 $\leq 2 \times 10^{-5} \text{T}$ 。

3) 装配与检验。用夹具固定工件, 检查对接边错位量 $\leq 0.1 \text{mm}$, 接缝间隙 $\leq 0.05 \text{mm}$ 。加强肋和固定片的装夹位置精度必须 $\leq 10'$, 它们与筒体之间的间隙应保持在 0.03mm 之内, 合格后装配到焊机的焊接转台上, 最后用无水酒精将接缝擦洗干净。注意戴细纱手套操作。

4) 非穿透性焊缝的焊接。在焊接加强肋和固定片的非穿透性焊缝时, 由于焊缝中所产生的气体和夹渣只能从熔池的上表面排出, 所需时间较长。为了延长熔池存在的时间, 可以采用较低的焊接速度、适当的散焦, 并附加电子束扫描运动的方法, 借对熔池金属的搅拌作用来加大气体和夹渣的上浮速度。

5) 轴向尺寸的保证措施。为了保证动力舱段壳体 $L \pm 0.3 \text{mm}$ 的轴向尺寸精度, 在零件焊接之前, 通过若干个模拟试件焊接, 测量和计算出焊接试件的收缩量, 据此确定零件毛坯的尺寸长度。

2.5.7 薄壁空心铝球的焊接

薄壁空心铝球作为静电陀螺仪的高速旋转球形转子, 采用硬铝合金 2A11 光车成两个半球再焊接成整球的结构, 最小壁厚 0.4mm , 如图 4-2-30 和图 4-2-31 所示。焊后球体通过研磨加工, 要求球体静平衡质量偏心小于 0.001mm 。

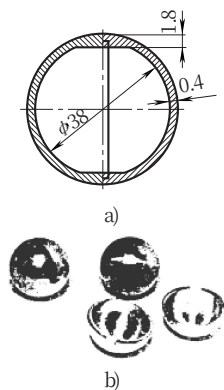


图 4-2-30 薄壁空心铝球

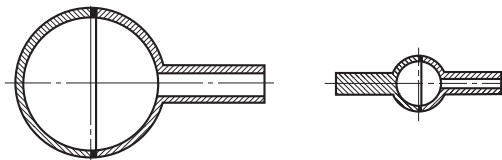


图 4-2-31 薄壁空心铝球的制作装配

(1) 技术要求

- 1) 焊缝均匀, 不得影响球体偏心率。
- 2) 焊缝不允许有裂纹, 穿透性气孔, 气密, 确保填充物不泄漏, 球体能在超高真空 ($10^{-5} \sim 10^{-6} \text{Pa}$) 环境下正常工作。
- 3) 焊缝强度高, 耐振动, 球体在每分钟几万转的离心载荷下可靠运行。
- 4) 工件焊接变形小, 圆球变形不得大于 0.1mm 。

(2) 材料 空心铝球材料采用 2A11 和 2A12, 主要成分为 Cu 3.8% ~ 4.8%, Mg 分别为 0.4% ~ 0.8%, 1.2% ~ 1.8%, Mn 分别为 0.4% ~ 0.8%, 0.3% ~ 0.9%, 其余为 Al (均为质量分数)。

(3) 焊接工艺措施 主要工艺措施如下:

1) 工件的精度: 两半球装配采用止扣接头, 接口加工精度要求高, 边缘不倒角, 过渡配合, 接缝紧密。

2) 接头清理: 焊接之前对工件进行以下清洁处理。

① 丙酮和氧化镁粉擦洗去污。

② 用10%的NaOH（质量分数）溶液去除氧化膜，浸泡约2 min，表面生成一层黑色的氢氧化物，再用清水冲洗或超声波清洗。

③ 用10%的HNO₃（质量分数）溶液中和，浸泡约8 min，表面重新变为银白色，再用清水冲洗或超声波清洗。

④ 无水乙醇脱水，冷风吹干。工件清理之后应尽快实施焊接，以减少新生氧化膜，表面气体吸附，增加气孔敏感性。

3) 工装夹具：为了控制空心铝球的焊接变形，设计了专用工装夹具，如图4-2-32所示。将两个半球分别装贴于两个托杯之中，将整个夹具连同工件放入真空室内，当达到工作真空度后利用底板上的导轨将两个半球合拢成整球，在两个半球合拢时，通过夹具对准球体的止扣部位，且压力要适中，以减少焊接变形；夹具不仅用于使两个半球体定位、减少变形，同时夹具内侧要与球面形状吻合，紧密接触，以达到散热作用。夹具上留有出气孔，与球体的出气孔连通，可以使球体内腔的气体排出，防止焊接时出现溅射或孔洞。

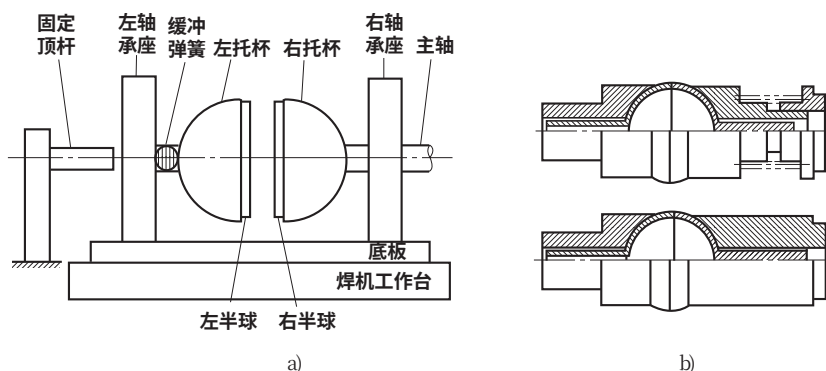


图 4-2-32 空心铝球装配焊接夹具

a) 工艺装备 b) 夹具

(4) 电子束焊工艺 主要工艺如下：

1) 控制热输入，适中的焊接热输入（功率/速度）可减少产生裂纹的倾向。

2) 通过工艺试验优化，薄壁空心铝球的焊接参数为：25kV，16mA，5.6r/min（线速度为650~700mm/min）。

铝球焊缝经气体示踪无损检漏，气密性优良，氦质谱探漏仪检漏，漏气率小于10⁻⁸PaL/s（仪器的灵敏度），满足航天部相关焊接技术标准。

2.5.8 铌钛异种金属直接电子束焊

铌钛物理性能和结晶体化学性能差异大，固溶度低，焊缝容易形成金属间化合物。由铌-钛相图4-2-33可知，在焊缝中靠铌侧熔合区会产生Ti₅Re₂₄化合物；靠近钛侧含有10%~15%铌（质量分数）的淬火组织中则生成ω脆性相；使接头的塑性韧性下降，导致产生裂纹。铌钛EBW必须采用了以下技术措施：在接合面制备中间过渡层以抑制脆性相产生；铌-钛两者的熔点（Re 3453K，Ti 1800K）和比热不同，需控制接头两侧的热输入，保证两者可靠熔化，以形成对称的熔核或控制焊缝金属的熔合比。

(1) 过渡层合金的设计 铌钛焊接中间过渡层合金的选用遵循以下原则：

1) 应与铌、钛形成固溶体，能有效抑制Ti₅Re₂₄化合物。

2) 中间过渡层材料的熔点应介于铌钛熔点之间，其原子半径、电负性等方面比较接近，选择处于周期表中ⅣB、ⅤB、ⅥB、ⅦB族的元素。

3) 基于铈钛、铈钼相图分析, 确定中间过渡层钼-铈-钛三元合金系。

4) 基于试验分析确定复合过渡层合金铈-钼-钛的比例: 铈 25% ~ 30%、钼 55% ~ 60%、钛 10% ~ 20%。

(2) 复合过渡层制备 将配置的 Re、Mo、Ti 合金粉末用有机粘结剂涂敷在钛合金上, 干燥固化后, 进行真空电子束熔炼, 直接在钛合金基体制备复合过渡层。真空电子束自动控制熔炼制备焊接参数为: 加速电压 50 kV, 束流 15 ~ 25 mA, 聚焦电流 500 mA; 加热时间 1 ~ 3 min, 速度 150 mm/min, 电子枪真空度 2.2×10^{-3} Pa, 真空室真空度 2.2×10^{-3} Pa。束流加载曲线如图 4-2-34 所示。

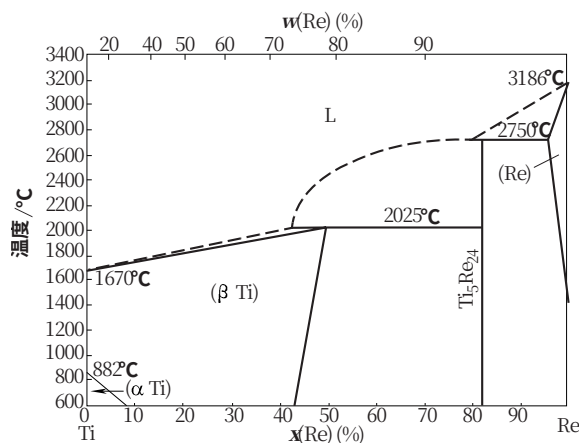


图 4-2-33 铈-钛相图

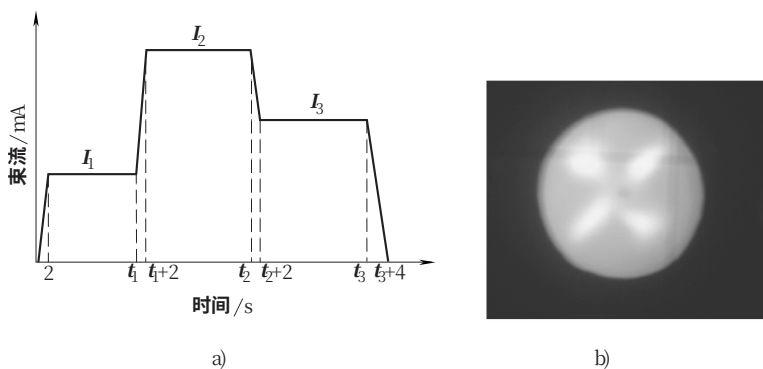


图 4-2-34 束流加载曲线

a) 束流加载 b) 分束扫描熔炼

复合过渡层的熔炼过程分三个阶段: 预热、加热和稳定化处理。0 ~ t_1 时间内, 预热; 小束流加热, 防止粉末金属大量飞溅; t_1 ~ t_2 时间内, 大束流加热, 过渡层金属粉末全部熔化; t_2 ~ t_3 时间, 减小束流, 成分均匀处理; 预热束流 4 ~ 5 mA, 预热时间 30 s, 熔炼束流 15 ~ 25 mA, 熔炼加热时间 1 ~ 3 min, 均匀化处理束流 5 ~ 10 mA, 均匀化处理时间 0.5 ~ 1 min; 电子束扫描熔炼速度 140 ~ 160 mm/min。

(3) 接头设计 根据接头装配尺寸要求, 对 Ti 棒端的 Re-Mo-Ti 熔敷层进行精密加工, 铈管内孔研磨加工, 再将两者组装在一起, Ti/过渡层/Re 焊接接头如图 4-2-35 所示。装配焊接前, 钛和铈管接头均用丙酮清洗去除油脂, 在真空室中, 进行电子束束焊。

(4) 电子束焊工艺 主要工艺如下:

1) 电子束焊的焊接参数为: 加速电压 60 kV, 聚焦电流 598 mA, 焊接速度 9.89 mm/s, 真空度 2.2×10^{-3} Pa, 真空室真空度 2.2×10^{-3} Pa, 预热束流 4 ~ 5 mA, 预热时间 8 s, 焊接束流 16 mA, 焊接时间 4 s。

2) 控制铈-钛接头两侧的热输入比为 9:1。热输入分配如图 4-2-36 所示。

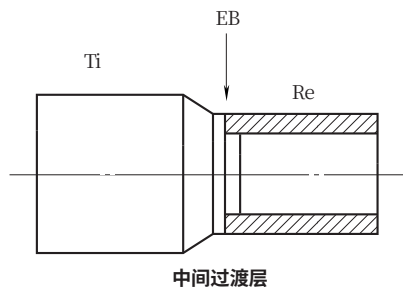


图 4-2-35 铈-钛电子束焊焊接接头

(5) 电子束焊接头的性能 具有复合过渡层铯-钛电子束焊接头形貌,如图4-2-37所示。中间部分为铯管,两端为7715D钛合金。

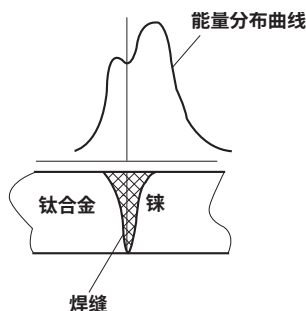


图 4-2-36 铯-钛接头两侧的热输入控制

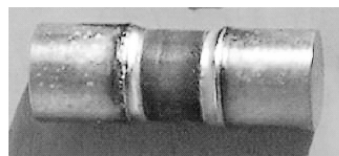


图 4-2-37 具有复合过渡层的铯-钛电子束焊焊接接头

焊后对铯-钛焊接接头进行真空热处理,改善接头性能,在真空炉中 1323K 温度下保温 60min 随炉冷却。焊接接头经 X 射线探伤合格,没有发现裂纹及其他超标缺陷。使用氮气进行气密性试验合格,试验压力 2MPa,保压 15min,焊缝没有发生泄漏。水压试验合格,压力 3MPa,保压 15min,焊缝没有发生泄漏。铯-钛焊接接头的强度为 CVD 铯的强度的 94%,满足设计技术指标。

2.5.9 固体火箭发动机壳体的焊接

固体火箭发机构件的接头形式尺寸如图 4-2-38 所示。材料 30Cr3 中碳调质钢。筒体制作工艺:分段筒体旋压——退火——热处理(淬火+低温回火)——真空电子束焊,将电子束焊作为发动机壳体加工的最后一道工序。在 EBW2100/15-150CNC 型真空电子束焊机(最大加速电压 150kV;最大电子束流 100mA;最大功率 15kW)上,进行真空电子束焊。

(1) 筒体焊接技术要求 焊缝 100% X 射线拍片,按 GB/T 3323—2005 标准 I 级焊缝验收;焊接接头抗拉强度 $R_m \geq 1.617\text{GPa}$;塑性断裂;产品爆破压力 $p_b \geq 26.82\text{MPa}$ 。

(2) 技术难点 容易出现冷裂纹;中碳调质钢焊接热影响区软化。

(3) 主要工艺措施 主要措施如下:

1) 高真空度:真空度 P_{vac} 要求小于 $2 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 。相同功率下,真空度越高,电子束不易散射,束流的能量密度越集中,焊缝的热影响区越窄。

2) 提高加速电压:提高加速电压 U_a ,进一步提高电子束焦点的功率密度,从而使热影响区的软化带宽度更窄。

3) 选择合适的焊接速度 V_w ;为避免焊接冷裂纹和过热区的脆化,焊接速度不宜太快,为减小热影响区的软化程度,焊接速度也不能太慢。

4) 焊前预热:利用散焦电子束对接头进行一定时间的预热,避免产生冷裂纹,降低热影响区的硬度,改善焊接接头的性能。

5) 回火处理:焊接结束用散焦电子束及时对焊缝进行回火的处理,降低焊缝冷却速度,减小冷裂纹倾向,有助于消除应力和改善接头性能。

6) 通过电子束焊试验,优化焊接参数,发动机壳体实际使用的电子束焊焊接参数见表 4-2-8。

发动机壳体焊接接头的抗拉强度为 1.78GPa,接头抗拉强度降低 4% 左右。国外同类钢种 42Cr2MnSiNiMo 厚度为 4.5mm,淬火态试件真空电子束焊时,抗拉强度和接头强度分别下降 22% 和

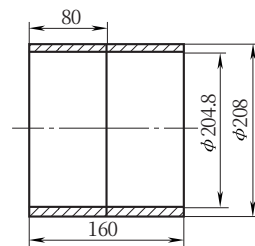


图 4-2-38 火箭发动机壳体焊接接头

6%。按 1:1 比例焊接制作的产品的爆破试验 $p_b \geq 27\text{MPa}$ （焊缝未破裂）。焊接接头的抗拉强度以及爆破压力均已达到设计指标，焊缝强度系数可达 96%。

表 4-2-8 发动机壳体电子束焊焊接参数

焊接参数	U_a/kV	I_b/mA	$v_w/(\text{mm/s})$	t_h/min	P_{vac}/Pa
预热	150	1.5	20	5	$<2 \times 10^{-2}$
定位焊	150	3.5	50	—	—
深熔焊	150	8.7	30	—	—
回火	150	1.0	20	5	—

参 考 文 献

[1] 史耀武. 材料工程大典 (23 卷) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[2] 王之康. 真空电子束焊设备及工艺 [M]. 北京: 原子能出版社, 1990.

[3] 李亚江. 特种焊接技术及应用. [M] 北京: 化学工业出版社, 2004.

[4] 张锋. 钛合金压力容器的电子束焊 [J]. 焊接技术, 2009, 38 (2): 62 ~ 63.

[5] 王国平, 王志远. 大型客车后桥壳半轴真空电子束焊 [J]. 汽车工艺与材料, 2004 (11): 13 ~ 14.

[6] 宋宜梅, 李少林. 电子束技术在工业领域中的应用 [J]. 广西机械, 2003 (1): 17 ~ 21.

[7] 潘丽华, 孙卫东. 30Cr3 钢壳体淬火态下真空电子束焊工艺 [J]. 推进技术. 2003, 24 (5): 478 ~ 480.

[8] 舒学芳, 张从平, 杨冬. 真空电子束深熔透焊接原理浅析 [J]. 东方汽轮机, 2006. (3): 8 ~ 14.

[9] 王慧贤, 董占贵, 刘晓龙. ZL114A 结构件电子束焊工艺 [J]. 电子束加工技术, 2004 (21): 176 ~ 178.

[10] 袁鸿, 余槐, 史亦韦. 大型推进齿轮电子束钎焊工艺缺陷分析 [J]. 航天技术, 2004 (4): 8 ~ 11.

[11] 林祖强. 电子束焊在齿轮加工中的应用. 机电工程 [J], 2007, 24 (4): 52 ~ 53.

[12] 王学东, 李少青, 姚舜. 电子束钎焊的能量密度控制方法 [J]. 焊接, 2005 (6): 21 ~ 24.

[13] 李少青, 张毓新, 王学东. 基于电子束能量分布控制的异种金属的焊接 [J]. 机械工程材料, 2005, 29 (9): 35 ~ 37.

[14] 周琦, 刘方军. 电子束深熔焊溶质密度分布与熔池流动行为 [J]. 焊接学报, 2001, 22 (5): 17 ~ 20.

[15] 樊兆宝, 安绍孔, 毛智勇. 动力舱段壳体电子束焊接技术 [J]. 航空制作技术, 2007 (Z1): 356 ~ 360.

[16] 林世昌, 雷田玉. 空心铝球电子束焊 [J]. 电焊机. 2005, 35 (9): 19 ~ 22.

[17] 常艳君, 董俊慧. 铝合金电子束焊气孔分析 [J]. 焊接, 2005 (11): 43 ~ 45.

[18] 张心宝. 异种金属电子束焊特点及应用现状 [J]. 太钢科技. 2007 (3): 25 ~ 29.

第 3 章 电 渣 焊

电渣焊 (Electroslag Welding, ESW) 是一种利用电流通过熔渣产生的电阻热作为热源的熔焊方法, 是一种在垂直位置或接近垂直位置使用的高效单道焊焊接工艺。电渣焊由前苏联巴顿焊接研究所于 1951 年发明, 用它代替大电流埋弧焊, 焊接厚壁压力容器上的纵向焊缝。电渣焊适用于焊接厚度 25mm 以上的厚板或大截面钢结构, 在水压机、轧钢机、重型机械、桥梁、石化、锅炉压力容器、冶金、高层建筑等大型设备制造业中得到广泛使用。电渣焊适用于碳钢、合金钢、不锈钢、铝等金属材料焊接。

3.1 电渣焊原理及特点

3.1.1 电渣焊原理

电渣焊利用电流通过熔渣所产生的电阻热作为热源, 将填充金属和母材熔化, 凝固后形成牢固接头。电渣焊开始时, 先在焊丝和接头底部的引弧板之间产生电弧, 使电弧周围的焊剂熔化, 形成液态熔渣, 当在接头空腔内形成一定深度的渣池后, 提高焊丝的送进速度, 降低电源电压, 使焊丝插入渣池, 将电弧熄灭, 从此将电弧焊转变成电渣焊。

3.1.2 电渣焊工艺特点

与电弧焊相比, 电渣焊具有下列特点:

- 1) 用电流通过熔融渣池产生的电阻热, 加热和熔化接头金属, 随后冷却凝固形成接头。
- 2) 电渣焊适合于厚度大于 25mm 的钢板焊接; 采用对接接头, 不用开坡口, 只需接头装配保留 20 ~ 40mm 的间隙, 一次焊接成形 (丝极电渣焊的最大厚度 300 ~ 400mm, 板极电渣焊和熔嘴电渣焊的最大厚度可达 1000mm), 板材不会产生角变形; 不开坡口, 节约了坡口加工时间, 节省了钢材和填充金属量; 焊剂的消耗也只有埋弧焊的 1/15 左右。焊件厚度越大, 优势就越明显; 对于大厚度工件的焊接来说, 电渣焊生产效率最高, 成本最低。
- 3) 在垂直位置或接近垂直位置进行焊接。
- 4) 电渣焊电能几乎全部变为热能, 电能消耗量也比埋弧焊少 35%。电渣焊渣池的热容量大, 对电流的短时间变化甚至中断不敏感。
- 5) 电渣焊时, 熔池金属上面始终覆盖着一定深度的渣池, 避免了空气与熔池金属的接触。
- 6) 电渣焊是一种机械化焊接方法, 焊丝送进、焊缝强制成形水冷铜块提升驱动、渣池液面高度控制和驱动、引弧渣池建立、电弧-电渣焊过程转变等均可实现自动控制。
- 7) 由于液态金属停留时间长, 有利于熔池中气体和杂质的排出, 电渣焊一般不易产生气孔、夹杂等缺陷。电渣焊焊缝及近缝区的冷却速度缓慢, 对碳当量高的钢材不易出现淬硬组织和裂纹, 故焊接低合金高强度钢和中碳钢时通常不需要预热。
- 8) 焊缝采用水冷铜块强制成形。
- 9) 电渣焊焊缝成形系数调节范围大, 通过调节焊接电流和电压, 可以在较大范围内调节焊缝形状系数, 易于防止产生焊缝热裂纹。
- 10) 电渣焊焊接热输入大, 热影响区在高温停留时间长, 易产生晶粒粗大的过热组织, 焊缝

金属呈粗大铸态组织，焊接接头冲击韧度低，一般焊后需进行正火和回火热处理以改善接头的组织与性能。但如果热处理或焊丝等选择不当，接头的冲击韧度较难改善。对于大型焊接结构，难以进行正火和回火处理时，可以通过采用药芯焊丝或向熔池添加变质剂方法，增加非自发形核核心，细化晶粒；也可通过施加外场（振动、磁场），使焊缝晶粒细化，热影响区原奥氏体晶粒尺寸和冷却时固体相变产物尺寸略有下降，从而使焊接接头韧性有所改善。

3.1.3 电渣焊过程

将两块焊件保持垂直，在接头之间保留 20 ~ 40mm 间隙，在接头底部附有厚度相同的引入板和引出板。为了保持渣池的深度和熔池的形状，在接头的两侧安装水冷铜滑块（或挡板），成形滑块固定在机头上并随焊机沿接头垂直向上移动，焊机采用机械化自动化驱动，以保持焊接过程的稳定性。随着水冷滑块的向上移动，渣池和熔池同步上升，熔池底部金属凝固形成焊缝。铜滑块表面加工成形凹槽，使焊缝表面略有增高并覆盖一层薄渣。在焊接过程中需断续地向渣池中添加焊剂来补偿冶金反应等造成的熔渣的消耗，可通过手工添加新焊剂，也可使用药芯焊丝向渣池补充焊剂。为了减小焊接缺陷，将渣池和熔池延伸到接头之外，需要在接头顶端安装引出板。

电渣焊开始时，在焊剂层中使焊丝与接头底部的引弧板短路起弧，在电弧热作用下，焊剂熔化，随后不断添加焊剂，形成液体渣池，待渣池达到一定深度时，增加送丝速度并减少电弧电压，使焊丝插入渣池，电弧熄灭，转入正常的电渣焊过程。

焊接电流从焊丝端部经渣池流向工件，在渣池内产生大量的电阻热，渣池最高温度可达 1700 ~ 2000℃；使焊丝和接头的两侧壁不断地熔化，熔化的金属沉积汇聚到渣池下面形成金属熔池，随着焊丝的不断送进，熔池及渣池液面不断上升，熔池底部的液态金属冷却凝固，形成焊缝。随着机头向上移动，同时送丝机构和水冷铜滑块同步上移，焊接接头空腔内渣池、熔池也随之上升，熔池下部的液体金属慢慢地冷却凝固、形成焊缝。该过程持续进行，直到接头上端的引出板，完成整个接头的焊接。

在引弧建立渣池阶段，电弧过程不够稳定，渣池温度不高，易形成焊缝和母材金属熔合不良。而焊接结束阶段易产生缩孔，在引出阶段，应逐步降低电流和电压，以尽量减少产生缩孔、裂纹等缺陷。焊后应将引弧板和引出板段的焊缝割掉，与焊件接头端部平齐。

3.2 电渣焊工艺

3.2.1 电渣焊方法

按电极形式，电渣焊可分为丝极电渣焊、带极电渣焊、板极电渣焊、熔嘴电渣焊、熔管电渣焊等。按导电嘴是否熔化，又分为熔嘴电渣焊和非熔嘴电渣焊。几种典型的电渣焊原理如图 4-3-1 所示。

1. 非熔化导电嘴电渣焊

图 4-3-1a 所示为非熔化导电嘴丝极电渣焊原理，使用丝极或板极、带极作为填充金属。焊接过程中机头拖动送丝机构、水冷铜滑块沿焊接接头垂直向上移动。根据焊件的厚度可使用一根或几根焊丝做填充金属，焊丝通过不熔化的导电嘴连续送入接头渣池中，导电嘴至渣池表面的距离一般为 50 ~ 75mm。焊接较厚的材料时，一根或几根焊丝可以在接头中做横向摆动。随着机头垂直向上移动，送丝机构和水冷铜滑块同步上移，焊接接头空腔内渣池、熔池也随之上升。焊机的垂直移动速度应与焊丝的熔敷速度相匹配。

焊丝可用实心焊丝，也可用药芯焊丝，药芯焊丝熔化的同时又向渣池补充焊剂。丝极电渣焊可

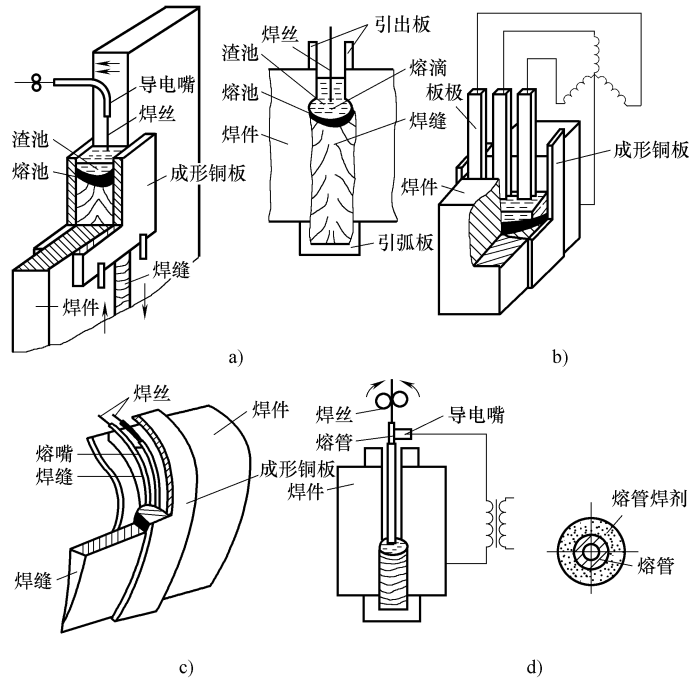


图 4-3-1 几种典型的电渣焊原理

a) 丝极电渣焊 b) 板极电渣焊 c) 熔嘴电渣焊 d) 熔管电渣焊

焊接厚度 13 ~ 500mm 的板材，单丝摆动可焊接厚度达 120mm 的板材，双丝可焊接厚度达到 230mm，三丝可焊接厚度达到 500mm。每根焊丝每小时熔敷金属量 11 ~ 20kg，焊丝直径一般为 3.2mm。焊接过程中，不出现电弧、无飞溅，焊丝的熔覆效率几乎为 100%。丝极电渣焊适合于焊缝较长的工件及环焊缝的焊接。

板极电渣焊使用金属板条作为熔化电极，板条的数目取决于工件厚度，可以根据被焊工件厚度不同，采用一块或数块金属板条做填充金属。焊接时，板极不须做横向摆动，只需向下送进，因而设备简单。与丝极相比较，板极容易制备，不仅经济，而且对于某些难以拔制成焊丝的合金钢更有意义。板极电渣焊因受板极送进长度和自身刚度的限制，一般适用于大断面、短焊缝的焊接。

2. 熔化导电嘴电渣焊

熔化导电嘴电渣焊也称熔嘴电渣焊，是利用焊丝和固定在接头间隙中并与工件绝缘的熔嘴共同作为熔化电极。焊接过程中，机头固定在接头的顶部，熔嘴与不断送进的焊丝被熔融焊剂所熔化。熔嘴由一个或数个导丝管或板极组成，其形状与被焊工件断面形状相似，它不仅起导电嘴的作用，而且熔化后作为焊缝填充金属的一部分，也就是说填充金属由焊丝及导丝的导电嘴同时供给。熔嘴电渣焊的原理如图 4-3-2 所示。

熔嘴电渣焊的焊丝通过一个与焊件接头长度（高度）相当的导电嘴送到接头的底部，导电嘴正好在渣池表面熔化，熔嘴的外面可涂上焊剂以使其与工件绝

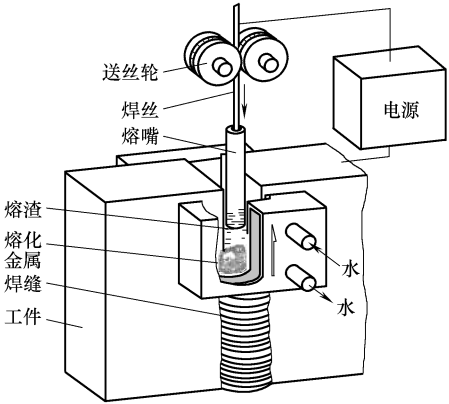


图 4-3-2 熔嘴电渣焊的原理

缘并补充熔渣的消耗。焊接电流由导电嘴传导经渣池流入工件，使焊丝、熔嘴和接头侧壁金属熔化，焊接时机头不需做垂直移动，采用固定的水冷挡块，控制焊缝成形。

随着焊接过程的持续和熔池液面的上升，熔嘴熔化并成为焊缝金属的一部分，熔嘴占填充金属5%~10%。根据工件厚度不同，可选用一个或几个熔嘴进行焊接，对于短焊缝，冷却成形块的长度可与接头长度相同，对于较长的接头，可以使用几组冷却挡块。熔嘴电渣焊可用于焊接比板极电渣焊更大断面的工件，并且适用焊接不规则断面的工件。此外，焊缝的化学成分可通过熔嘴和焊丝材料化学成分의 恰当配合，进行调整。熔嘴电渣焊所用设备也比较简单，焊丝的送进用一般送丝机构即可。

管极熔嘴电渣焊（熔管电渣焊）是熔嘴电渣焊的一个特例，采用外面涂有药皮的无缝钢管（或无药皮的钢管）作为熔嘴，弧焊电源的一极接在管状熔嘴的上端，焊接过程中，在电阻热的作用下，管状熔嘴与管内不断送给的焊丝都作为填充金属一起熔化，凝固后形成焊缝。钢管外壁所涂的药皮除了起绝缘作用并使装配间隙缩小外，还可起自动补充熔渣和向焊缝金属中过渡一定量合金元素的作用，有利于化学成分的调节，起到细化晶粒、改善焊缝的组织性能的作用。若熔嘴是无药皮的光钢管，焊接过程中应随时加入适量的专用焊剂。当焊接厚度较大的焊件时，可选若干个管状熔嘴，并用一台多头送丝机送给焊丝，以提高生产效率。

3.2.2 电渣焊焊接参数

电渣焊焊缝质量取决于焊接参数和焊接过程的稳定性。电渣焊熔池的冷却速度和结晶过程与铸型中液体金属的冷却过程十分相似。熔池四周的母材和水冷铜滑块，将熔化金属的热量带走，于是熔化金属从母材与熔池的界面和水冷铜滑块表面开始凝固并向焊缝中心生长，随着填充金属熔化，机头向上移动，渣池和熔池上升，同时熔化金属从熔池底部开始凝固慢慢地向上生长。晶粒在焊缝中心相交的角度，决定于焊接熔池的形状。焊接熔池的形状用焊缝形状系数来表征。焊缝形状系数是指熔宽与其最大熔深之比，其中宽度是接头间隙加上两侧母材的熔深。熔深是指从焊接熔池的表面到其最低的液-固界面的距离。形状系数大（宽而浅的焊接熔池）的焊缝，促使晶粒以锐角相交方式凝固。形状系数小（窄而深的焊接熔池）的焊缝，促使晶粒以钝角相交方式凝固。晶粒在焊缝中心相交的角度影响焊缝抗中心热裂纹的能力，晶粒若以钝角相交，抗裂性则低，而以锐角相交，抗裂性就高。因此，焊缝形状系数较大的焊缝具有较好的抗裂性。

调节焊接参数可以控制焊接熔池的形状，但必须指出仅仅依靠焊缝形状系数并不能完全控制焊缝裂纹，母材的化学成分（特别是含碳量）、填充金属的成分以及接头拘束度对焊缝裂纹倾向也有很大的影响。

电渣焊的焊接参数主要有焊接电流、焊接电压、装配间隙、电极数目、摆动参数、渣池深度、焊接速度和送丝速度等。

1. 焊接电流

提高焊接电流，熔池的深度增大。当用直径3.2mm焊丝和接近400A电流焊接时，提高焊接电流也增大焊缝的宽度，焊缝形状系数略有减小。但是，当用直径3.2mm焊丝和高于400A电流焊接时，提高电流便减小焊缝宽度。因此，提高焊接电流的最终影响是减小形状系数，由此降低接头的抗裂性。

对于直径3.2mm焊丝，一般采用500~700A电流。对于易产生裂纹的金属或焊接条件，要求较大的焊缝形状系数，以低于500A焊接电流焊接。

当采用恒压弧焊电源时，焊接电流与送丝速度成正比，提高送丝速度便提高了焊接电流和熔敷率。

2. 焊接电压

焊接电压对焊缝的熔深和焊接过程的稳定性有重要的影响。它是控制熔深的主要参数,提高焊接电压可增大熔深和焊缝的宽度。为保证焊缝边缘部位完全熔合,焊缝中部的熔深必须略大于需要值,因为在焊缝边缘部位必须抵消水冷滑块的激冷作用。

提高焊接电压使焊缝宽度增大,也就提高了熔池形状系数,并因此提高了焊缝的抗裂性。但焊接电压应保持在一定的范围内,以保证焊接过程的稳定。如果焊接电压太高,可能导致飞渣和在渣池顶面燃弧而使焊接过程不稳定,而焊接电压太低,易产生短路或在金属熔池上燃弧。每根焊丝焊接电压一般选用32~55V,焊接较厚工件时,选用较高的电压。

3. 焊丝伸出长度

从渣池表面到导电嘴端面之间的距离,称为焊丝伸出长度。采用恒压弧焊电源和等速送丝机构时,增大焊丝的伸出长度将增大电阻,则必须通过加长焊丝在导电渣池内的长度来补偿,使弧焊电源降低输出电流,从而略微增大焊缝形状系数。如果采用调高焊接电压来获得需要的焊接电流值时,则焊缝形状系数显著增大。

焊丝伸出长度一般选用50~75mm。通常伸出长度小于50mm会引起导电嘴过热,伸出长度大于75mm,由于电阻增大而引起焊丝过热。因此,在大的伸出长度下,焊丝是在渣池表面而不是在渣池中熔化,则会造成电渣焊过程失稳及渣池的不正常加热。在熔嘴电渣焊中不存在焊丝伸出长度。

4. 焊丝根数和间距

随着每根焊丝所占的金属厚度的增加,焊缝宽度略有减小,焊接熔池的深度则显著减小。这样,在焊丝根数给定的情况下,随着材料厚度的增大,焊缝形状系数有所改善。但是当冷却滑块近旁的焊缝宽度小于接头间隙而导致边缘未熔合时,必须增加焊丝根数。一般来说,对于厚度130mm以下的部件,可以利用一根摆动的焊丝,而厚度300mm以下的工件,可用两根摆动焊丝焊接。每增加一根摆动的焊丝,工件厚度相应可加大约150mm。如果焊丝不摆动,每根焊丝可焊接约65mm的板厚。三丝电渣焊原理如图4-3-3所示。

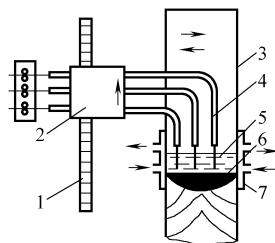


图4-3-3 三丝电渣焊原理图

1—导轨 2—焊接机头 3—焊件 4—导电嘴
5—渣池 6—熔池 7—水冷成形块

5. 焊丝摆动

对于厚度在75mm以下的板材,可不用焊丝摆动和采用较高的焊接电压进行焊接。但是,板材厚度大于50mm时,往往要求焊丝沿板厚方向做横向摆动。这种摆动使热量均布并有助于获得较好的边缘熔合。摆动速度在8~40mm/s之间变化,速度随板厚加大而加快。一般说来,摆动速度是以3~5s的往复运动时间为基础。提高摆动速度便减小了焊缝宽度,从而也减小焊缝形状系数,因此,摆动速度必须与其他参数匹配。为了使母材完全熔合及抵消冷却滑块的激冷作用,在摆动行程终端应停留一定时间,停留时间一般在2~7s。

6. 渣池深度

必需的最小渣池深度应使得焊丝插到渣池之中并在紧靠渣池表面底下熔化。渣池太浅将引起熔渣飞溅并在渣池表面燃弧。渣池过深将减小焊缝宽度并由此减小焊缝形状系数。在过深的渣池中环流不良,可能造成夹渣。渣池最佳深度是38mm,但渣池深度在25~50mm之间,不会有大的影响。

7. 接头间隙

为取得足够的渣池体积、良好的熔渣环流效果以及在熔嘴电渣焊中为安放熔嘴及其绝缘所需的空

可能引起边缘未熔合。接头间隙一般为 20 ~ 40mm，取决于母材厚度、焊丝根数以及焊丝是否做摆动。

3.2.3 电渣焊辅助工艺措施

1. 接头制备

电渣焊采用 I 形坡口对接接头，接头加工制备简单。可以用热切割、机械加工方法进行加工。如果采用水冷滑块，坡口两侧的钢板表面则需适当磨光，以避免漏渣和卡住滑块。

对接面上应没有任何的油污、热轧氧化皮或水分，接头不需要像其他焊接方法那样要求的清洁。氧气切割表面不应有粘附的熔渣，表面轻微氧化并无大碍。在焊接开始之前应防止接头污染，包覆在滑块周围的带有水分的材料会引起焊缝气孔，在焊接之前应进行干燥处理。同样，水冷滑块的渗漏也可能引起气孔或焊缝表面缺陷。

2. 接头装配

在焊接之前，首先对工件进行组装使待焊接头具有符合要求的对中度 and 间隙，应使用刚性夹具或跨接头的定位板。在焊接完成之后，再将定位板拆除。

通常根据试验确定合适的接头间隙。随着自下而上的焊接，由于焊缝收缩使两焊件逐渐靠近。因此，装配时应考虑到这种收缩，接头顶部的间隙应比底部大 3 ~ 6mm。影响收缩裕量的因素包括材料类型、板材厚度和接头长度。

预留合适的接头间隙和收缩裕量是重要的，但是，如果接头间隙不当，在一定的范围可以通过改变焊接条件来弥补。例如，如果初始接头间隙太小，则可减小送丝速度来降低熔敷率。如果接头间隙太大，可在稳定操作限度内提高送丝速度。不管母材类型如何，对于较宽的接头间隙应采用较高的焊接电压。

如果接头间隙大于常规的焊丝根数的能力，若空隙允许可以再加一根辅助焊丝，也可以用焊丝摆动补偿过大的接头间隙。

当接头间隙大小时，接头填充可能太快而引起裂纹或边缘未熔合。由于焊缝收缩也能使小的接头间隙并拢而影响导电嘴横向摆动。

焊接接头的轴线应处于垂直或接近垂直的位置。偏离垂直位置的斜度可达 10°。增加角度加大了焊接难度，易产生夹渣和边缘未熔合等缺陷。

3. 装引弧板、引出板和起焊板

在要求接头全长度完全焊透的场合，需使用引弧板和引出板。引弧板装在接头的下端，起焊板装在接头的底部。一般来说，引弧板和起焊板采用与母材相同或类似的材料制成。引入板和起焊板组成了一个可在其中引弧、建立渣池进行焊接的空腔，引入板和起焊板的厚度与母材相同。在可使用引入板和起焊板的场合，引入板焊到每块母材钢板的下端，起焊板则横焊在引入板的底部，构成凹槽，凹槽表面应与母材表面齐平。起焊板也可以用铜模，通常要通水冷却，不能在铜模上直接引弧，因为这可能熔穿水冷铜模，在铜模上放一块或两块与母材相同的材料，并在其上引弧。

引出板材料也应与母材相同或相似，也可以采用铜板，但是必须用水冷却。引出板的厚度与母材相同，并且在接头端部可靠地与工件两块钢板相接。

4. 确定焊丝的位置

焊丝的位置决定了产生最大热量的部位。焊丝通常应处在接头的中心。但是，如果焊丝向一侧偏移，则可向相反方向移动导电嘴以抵消这一偏移。有时焊丝可做适当偏移以形成所要求的焊缝金属几何形状。

5. 引弧和结束焊接

起焊是在焊丝和引弧板之间起弧，一种是将钢丝球放在焊丝和起焊板之间并接通电源；另一种

是焊丝带电向起焊板送进,电弧一旦引燃,便缓慢添加焊剂直到电弧熄灭,后一种方法在电渣焊中使用较多。

在焊接开始前应检查设备,并准备足够的焊丝和焊剂。焊接设备必须能连续工作,直到焊接完成为止。

当焊缝达到引出板时,遵循填满弧坑的工艺进行停焊。通常,当熔渣达到引出板顶部并填满弧坑时,逐渐降低送丝速度,焊接电流也同时减小。当送丝停止时,切断电源。

3.3 电渣焊材料

电渣焊焊缝金属的成分由母材和填充金属的成分及熔合比所决定。电渣焊中所用的焊接材料包括焊丝和焊剂,采用熔嘴电渣焊时还包括可熔导电嘴及其绝缘材料,利用焊接材料调控焊缝金属的化学成分以获得所要求的焊缝力学性能。

3.3.1 焊丝

电渣焊使用的焊丝有实心焊丝和药芯焊丝两种,实心焊丝应用较广。焊丝的化学成分及性能应符合国家标准。通过在焊芯中添加合金元素可以调整填充金属的成分,药芯焊丝的焊芯也可向熔渣池补充一定量的焊剂。药芯焊丝的外层金属是低碳钢,当药芯完全由焊剂组成时,可能使熔渣过量。

在碳钢和低合金高强度钢的电渣焊时,焊丝的含碳量通常低于母材,通过焊丝中的锰、硅和其他元素合金化来提高焊缝金属的强度和韧性,以降低碳钢和低合金高强度钢焊缝金属产生裂纹的倾向。

在焊接合金含量较高的钢时,一般利用焊缝化学成分控制和热处理来提高焊缝的力学性能。焊丝选择应使焊缝金属与母材具有相似化学成分,以使填充金属和母材熔化充分混合后形成化学成分相似的均匀一致的焊缝,焊后焊缝通常需进行热处理,以达到所要求的焊缝及热影响区的力学性能。

在选择电渣焊焊丝时,要考虑到母材的稀释。稀释量或母材熔化量取决于焊接工艺,典型的电渣焊焊缝,母材的稀释率占30%~50%。

电渣焊焊丝常用的规格是直径2.4mm和3.2mm,也使用直径1.6~4.0mm焊丝。在相同焊接电流下,直径较小的焊丝比直径较大的焊丝具有较高的熔敷率。实际应用证明,直径2.4mm或3.2mm焊丝的可矫直性、送丝稳定性、焊接电流范围及熔敷率等综合性能最佳。

3.3.2 焊剂

在电渣焊过程中,焊剂熔化成熔渣,熔渣必须能传导焊接电流,并具有一定的电阻使电能转换成足以熔化填充金属和母材的电阻热,保证焊接过程的稳定。如果熔渣电阻太小,就会在焊丝和渣池表面之间燃弧。同时,熔渣还保护熔融焊缝金属不受大气污染。

熔渣应具有足够好的流动性以形成良好的循环流动,保证热量在接头中均匀分布。熔渣太黏将在焊缝金属中引起夹渣,熔渣太稀则会从工件和滑块之间的小间隙中泄漏出去。焊剂的熔点必须大大低于被焊金属的熔点,而其沸点必须略高于工作温度以避免由于损耗而可能改变其工艺特性。熔渣不应与所焊金属发生强烈的化学反应。在电渣焊过程中,熔渣在冷却滑块的表面和焊缝表面凝固成薄层渣略有损耗,因此,在焊接过程中需要往渣池中添加焊剂,以保持所要求的渣池深度,稳定渣池体积。

电渣焊用的焊剂通常是由硅、锰、钛、钙、镁和铝的氧化物组成,与埋弧焊使用的焊剂成分相

似,改变焊剂组分可获得特殊的性能。如果焊剂在高湿度下长期放置,使用前需将焊剂重新烘干。通常焊剂选择应与焊丝相匹配以获得所需的焊缝金属的力学性能指标。

3.3.3 熔嘴

熔嘴的主要作用是将焊丝从焊接机头引导到渣池,熔嘴刚好在上升的渣池顶面熔化。焊接电流在通过熔嘴时传导给焊丝,然后流入渣池和工件。

大多数熔嘴的外径为 16mm 或 13mm。熔嘴的内径则取决于所使用的焊丝规格。由于熔嘴变成了焊缝的一部分,所以其成分应与所要求的焊缝金属成分相匹配。

当焊接短焊缝时,可以采用裸露的熔嘴,对于长焊缝,熔嘴必须绝缘,以防止与母材接触。熔嘴外层既作为电绝缘材料,同时又向渣池补充了焊剂。涂层必须不影响所熔敷的焊缝金属,也不能影响熔渣的工艺特性。熔嘴的基本形式如图 4-3-4 所示。

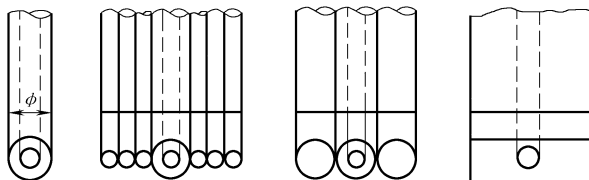


图 4-3-4 熔嘴的基本形式

3.4 电渣焊设备

电渣焊设备主要包括焊接电源、送丝机构、摆动机构、焊接机头(提升机构)、控制器、行走小车和水冷成形滑块(挡块)等。前述的丝极电渣焊和熔嘴电渣焊的设备,除导电嘴的结构和垂直行走机构有所区别之外,其他基本相同。

1. 焊接电源

电渣焊焊接电源应保证维持稳定的电渣过程,以及在焊接过程中维持焊接参数的稳定性(主要是焊接电流和电压)。基本要求如下:

(1) 保持稳定的电渣过程 电渣焊时,不应该出现电弧放电过程或电渣-电弧的混合过程,否则将破坏正常的焊接工艺过程,故电渣焊电源所需要的外特性与弧焊电源的外特性不同,应为空载电压低和感抗小的平特性电源。

(2) 保持焊接参数 即在电渣焊过程中要保持焊接电流、焊接电压不变,焊丝等速送进,熔渣的外特性为上升特性。电网电压发生变化或送丝速度变化时,具有平特性的弧焊电源所引起的焊接电流、电压变化小,自身调节作用强,恢复时间短。电渣焊电源要有足够的功率、较低的空载电压,较小的感抗和平外特性。通常电渣焊采用交流弧焊电源,其型号为 BP1—3×1000 和 BP1—3×3000。在没有平特性的弧焊电源时,也可使用下降特性的弧焊电源。

电渣焊焊接电压范围一般为 30~55V,最低空载电压为 60V。每根焊丝需接一台弧焊电源。

2. 送丝机构和摆动机构

送丝机构的功能是将焊丝从焊丝盘(桶)通过导电嘴等速送入渣池。送丝机构通常安装在焊接机头上,一般每根焊丝由一台驱动电动机和送丝滚轮输送,也可以用双齿轮箱,由一台电动机驱动两根焊丝,这时如果送丝出了问题就没有挽救的余地了,因为重新起焊处的补焊费用可能相当高;在多丝焊接的情况下,当一个送丝机构出了故障如能迅速地采取补救措施可不中断焊接。对于大型长焊件,要求送丝机构连续工作 50h 以上。

送丝机构的电动机驱动在设计和操作上与熔化极气体保护电弧焊和埋弧焊相似,送丝轮通常由齿轮对组成,滚轮的凹槽形状可按采用的实心焊丝或者药芯焊丝选择。使用实心焊丝时,要求送丝时不打滑,但也不要压得太紧,以免在焊丝上留下压痕,有压痕的焊丝可能对导管等附件产生磨损,带有椭圆形凹槽的送丝滚轮,不会压扁药芯焊丝,无论对实心焊丝还是药芯焊丝都合适。

通常采用焊丝矫直机构来矫直弯曲的焊丝。当焊丝从导电嘴伸出时,抛射式弯曲可引起焊丝偏移,从而引起焊接熔池位置的改变,导致未熔合等缺陷。

送丝速度取决于获得合适熔敷速度所对应的焊接电流,也取决于所采用的焊丝直径和种类。一般来说,送丝速度为 $17 \sim 150 \text{ mm/s}$ 对于使用直径 2.4 mm 或 3.2 mm 的药芯焊丝或实心焊丝是合适的。

当每根焊丝所占的接头厚度在 70 mm 以上时,则要求配备焊丝摆动机构。导电嘴的摆动可采用电动机驱动的机械机构,如丝杠或齿条等。摆动机构的行走距离、行走速度以及在每一行程终点的停留时间应该可调。

3. 焊接机头和控制器

在电渣焊中,焊件通常比较大而重,因此,焊接电源单独安装比较方便,采用长电缆连接和遥控。在焊接部位安装焊接机头,焊接机头包括送丝机构、焊丝盘、焊丝导电嘴、与导电嘴相连的电气接头以及将焊接机头装在工件上的机构。焊接机头还可装有多丝作业用的装置和焊丝摆动机构。在要求轻便的场合,送丝机构和焊丝盘可装在离焊接机头一定距离,和半自动熔化极气体保护电弧焊一样。

电渣焊控制器一般是轻型的,其控制功能主要有焊接电源的操控,每台焊丝驱动电动机的速度控制,导电嘴的摆动控制和焊接机头垂直上升的控制。

焊接机头垂直上升的控制器分手工提升和自动提升两种。自动控制提升装置可以采用光电传感器控制,传感器对准滑块上端附近某一点,并将其调整至可以探测到渣池液面的位置。当渣池上升到超过该点时,发出信号起动提升装置,向上移动焊接机头和滑块,直到不能再探测到渣池为止。如果已知板厚、根部间隙、焊丝根数及送丝速度,则可以近似地算出垂直提升速度,焊工也可通过人工干预调节提升速度。

4. 成形装置

成形装置包括挡块(滑块)及冷却水循环系统。挡块的功能是将金属熔池和熔渣保持在焊接区内。成形挡块用铜制造,通常在热量过分集中部位装有水通道以防止其过热和熔化。在每个挡块朝焊缝的侧面加工出一个成形凹槽,以使焊缝金属略有增高。

挡块可用循环水或自来水冷却。循环系统一般不应使挡块上出现冷凝水。如果冷凝水流到挡块下面并在开始焊接之前汇流到引弧板上,则容易使焊缝产生气孔。在焊接过程中由于渣池上升,挡块内面的冷凝水会蒸发。

采用不熔化的导电嘴电渣焊时,水冷挡块安装在焊接机头上并且随着焊接过程的进行而向上移动。采用熔嘴电渣焊时,挡块不移动。有时,成形挡块不用水冷却,但必须有足够大的体积,以避免熔化。挡块通过横跨于接头上的 U 形铁内的楔块夹紧,保持在适当的位置上,或者在用熔嘴电渣焊方法焊接的短焊缝上采用大号 C 形夹钳夹紧挡块。

3.5 电渣焊应用

3.5.1 箱形建筑钢结构隔板的电渣焊

在建筑钢结构中大量使用箱形结构钢柱。箱形的钢柱由四块钢板(称为壁板)组对焊接而成。

为了提高箱形柱的刚度和抗扭能力,在箱形柱与梁连接的节点处以及上下两节点之间内置隔板,结构设计要求隔板与钢柱壁板间的四条焊缝采取全焊透焊缝。由于柱内空间小,用一般的焊接方法(焊条电弧焊和气体保护焊)只能完成其中三条焊缝的焊接,在封上第四块壁板形成封闭的箱形空间后,最后一道焊缝如何施焊则成为一个难题。采用熔嘴电渣焊的方法可以解决此类问题,由于电渣焊热输入大,单侧使用电渣焊会引起柱子的变形,因此实际应用中是在隔板两侧对称采用熔嘴电渣焊。

1. 箱形的钢柱熔嘴电渣焊接头

隔板的侧壁根据电渣焊的要求预先加工,两侧焊好垫板,在箱形柱组装完成后,壁板、隔板和两块垫板之间构成了一个矩形孔道,这条矩形孔道形成熔嘴电渣焊的焊接区。

在引出板、引弧板与矩形孔道对应处分别钻出一圆孔,在引弧板圆孔处装上引弧器,在引出板圆孔处装上引出装置,通过引出装置和引出板圆孔从上至下在焊接区内安装熔嘴(管状熔嘴),焊丝由焊机经熔嘴连续供给,熔渣使焊丝、熔嘴和板壁的母材熔化从而完成电渣焊过程,箱形钢柱隔板熔嘴电渣焊如图4-3-5所示。

保证电渣焊焊缝金属的化学成分和力学性能,一般情况下焊丝根据母材的钢种选择,对于Q235钢可选用H08MnA;Q345钢可选用H10MnSi或H08MnMoA,对于15MnV可选用H08MnA或H08Mn2MoVA。采用HJ360、HJ431等焊剂。

管状熔嘴一般选用15钢或20钢冷拔无缝钢管,根据接头尺寸选用不同的规格,但焊丝直径要和管状焊条内径相匹配。对于管状焊条涂料要求具有一定的绝缘性,以防管极与工件发生电接触,并在溶入熔池后能保证稳定的电渣焊过程。此外为了细化晶粒,提高焊缝金属的综合力学性能,要在涂料中适当加入一些合金元素。熔嘴在坡口中的位置如图4-3-6所示。

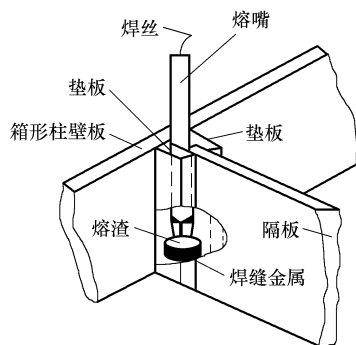


图 4-3-5 箱形钢柱隔板熔嘴电渣焊

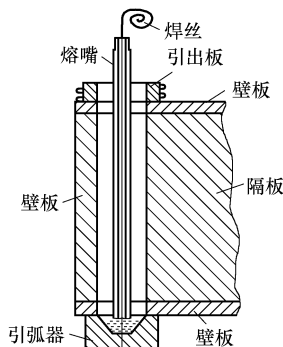


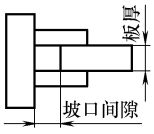
图 4-3-6 熔嘴在坡口中的位置

2. 箱形钢柱熔嘴电渣焊焊接参数

针对不同尺寸厚度的壁板、垫板、隔板,箱形钢柱熔嘴电渣焊的焊接参数也不相同,见表4-3-1。

当焊接电流过小时,焊接热输入不足,母材不能熔化或不能充分熔化,会导致焊缝金属和母材熔合不良;当焊接电流过大时,熔嘴表面覆盖的药皮不能与熔嘴熔化速度一致,出现药皮熔化速度过快,造成熔嘴端部10~15min失去药皮保护,也失去熔嘴端部的绝缘性,在较大的振动和熔池电磁力的作用下,熔嘴容易与周边母材发生短路,一旦发生短路,熔嘴端部易出现异常的一侧熔断,并发生熔嘴与母材粘连,送丝受阻。

表 4-3-1 箱形钢柱熔嘴电渣焊接参数

坡口形式	板厚/mm	焊丝直径 /mm	焊管外径 /mm	坡口间距 /mm	焊接电压 /V	焊接电流 /A	焊接速度 /(cm/min)	渣池深度 /mm
	12	2.4	8 或 10	18	30 ~ 38	350 ~ 400	1.6 ~ 1.8	25 ~ 45
	16	2.4	8 或 10	18	30 ~ 38	350 ~ 400	1.6 ~ 2.8	25 ~ 45
	20	2.4 或 3.2	10	22	32 ~ 40	350 ~ 420	1.5 ~ 2.7	35 ~ 55
	25	2.4 或 3.2	10	25	32 ~ 40	380 ~ 440	1.5 ~ 2.5	35 ~ 55
	30	2.4 或 3.2	10	25	34 ~ 42	400 ~ 480	1.4 ~ 1.9	35 ~ 55
	40	2.4 或 3.2	10	28	40 ~ 44	450 ~ 500	1.2 ~ 1.5	35 ~ 55
	50	2.4 或 3.2	10	28	40 ~ 46	450 ~ 550	1.1 ~ 1.4	35 ~ 55
	60	2.4 或 3.2	10	28	40 ~ 46	480 ~ 600	1.0 ~ 1.4	35 ~ 55

当焊接电压过低时，熔宽变小，容易在方形焊缝的四个角部产生未熔合现象；当电压过高时，熔度变大，一方面造成熔池内的熔化焊剂深度不足，产生明弧现象，破坏焊接过程的稳定性；另一方面，熔池变大，在垫板、壁板或垫板壁板尚未组焊的间隙处，以及最后组焊的垫板与隔板接触部位产生烧穿，熔化的焊剂和熔池金属迅速流失，造成焊接中断。

坡口间隙过大，造成需要的熔宽增大，相应的电流电压增大，容易造成距离熔嘴较近的垫板或侧板烧穿，同时，距离熔嘴最远的焊缝角落熔合不良，更重要的是焊接填充量急剧提高，焊接速度明显降低；坡口间隙过小，熔嘴位置的可调余量过小，当外界微小的振动或焊接机构发生微小的抖动时，熔化的熔嘴都会与四周母材发生碰撞，造成短接、粘连甚至停焊。

坡口清理过程包括：壁板下料后、组对隔板之前，要对坡口及其两侧一定范围进行打磨处理，并在以后各工序中保持清洁；隔板组在组对成一体前，要对待焊隔板侧端面、垫板侧面进行处理，以保证组对后电渣焊坡口干净，无杂质，并在以后各工序中保持整洁；立柱在钻孔后，电渣焊施焊前对坡口进行检查、清理和处理，对于其他工序残留的杂物、钻孔后的残屑等进行清理；对于钻孔后残留的水分、油污等，在钻孔后应立即烘烤处理干净，避免放置生锈。垫板与壁板应尽可能密贴，其间隙控制在 0.5mm 以下，并用耐火泥对间隙进行密封处理。

进入正常焊接之后，要注意不断地观察焊机工作情况、焊接参数的准确性、渣池状态等，并及时做出调整，确保焊接过程顺利进行。要特别注意检查熔池熔化是否充分，焊接过程中，时刻注意渣池深度的调整，可采用添加焊剂的方法，使渣池始终保持适当的深度。渣池太深，会导致熔宽减小，造成渣池温度下降，易使焊接边缘加热不足，而产生未熔合或熔合不良等缺陷；渣池太浅，即使焊接电流增大，电渣焊过程也不稳定，焊丝容易接触到工件金属发生短路，使飞溅加大，导致焊接中断。当渣池翻滚较大出现明弧时，应及时添加焊剂，当渣池恢复平稳状态后则暂停添加，以少而慢为原则，要防止一次加入量太大，否则易造成焊缝熔合不良等缺陷。

观察焊口外钢板接触面的颜色与宽窄也可判断内部熔合情况，熔合良好的外钢板呈樱红色，约 800℃，颜色均匀，比焊口稍宽，且宽窄较均匀。当温度不足时，应适当调整焊接参数，适当增加渣池内的总热量。

焊缝收弧时应适当减小焊接电压，并断续送进焊丝，将焊缝引到引出板上收弧。当渣池上升到与引出板上口接近平齐时要注意观察，当焊缝高出熄弧铜帽时，按焊机上“停止”按钮停止工作，焊接完成，反抽焊丝，提起熔嘴，在渣池尚未完全凝固之前，拆除引出板。

若焊接过程中出现熔池泄漏，则需迅速逐步少量加入焊丝段及焊剂至泄漏停止，若仍泄漏则停止焊接并提升熔嘴，加入适量焊丝及焊剂，然后再引弧焊接，同时对起弧部位做出标记，作为焊后重点检查部位。

3.5.2 重型厂房柱子的管极熔嘴电渣焊

某一连铸连轧车间厂房立柱采用双 H 型钢 SAW 拼焊，其断面如图 4-3-7 所示。由于立柱太长，

重型双 H 型钢立柱分两段制作, 然后采用管极熔嘴电渣焊拼焊成整根。

重型双 H 型钢母材是日本 SM41B 钢。采用国产 H08A 镀铜焊丝, $\phi 3.2\text{mm}$ 。熔嘴采用国产 10 钢管, 规格为 $\phi 12\text{mm} \times 4\text{mm}$ 。长度超出焊缝长度 200mm。管状熔嘴下端略作收口, 使其内径接近焊丝直径, 以便于引弧, 钢管涂层主要由焊剂和铁合金组成, 焊剂的基本组成如下 (质量分数): 锰矿 36%, 滑石粉 21%, 石英石 19%, 萤石 14%, 钛白粉 5%, 金红石 3%, 白云石 2%。每 1000g 药粉中铁合金的添加量为: 中碳锰铁 100g, 硅铁 155g, 钼铁 144g, 钛铁 100g。粉状焊剂和铁合金搅拌均匀后, 用钾水玻璃或钠水玻璃调和, 在专用压涂机上挤压成形, 均匀地涂敷在钢管外表面上, 厚度为 2~3mm。

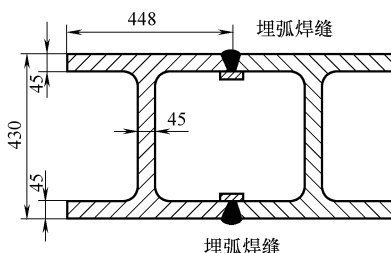


图 4-3-7 双 H 型钢立柱断面图

1. 焊前准备

工件的接头端面用氧乙炔焰切割, 清除切口边缘的氧化物, 铁锈等污物。用氧乙炔焰加工型钢腹板的 15° 坡口, 并清理坡口两侧的污物。为了使内侧的固定成形板、外侧的水冷成形装置与型钢的翼板贴紧, 在焊口两侧 150mm 范围内用砂轮打磨掉埋弧焊缝余高。

2. 工件装配

在专用胎架上装配两段重型双 H 型钢, 留出 25~28mm 间隙, 加装引弧板和引出板, 用 CO_2 焊接上下两面双 H 型钢腹板的对接缝。

翻转工件, 将电渣焊焊缝置于立焊位置, 加装引弧板、引出板, 内侧固定成形板, 外侧加装水冷强迫成形装置。装配后, 用耐火泥密封成形板与工件之间的缝隙, 将管状熔嘴放置于接头间隙中, 如图 4-3-8 所示。

3. 建立渣池

焊丝沿管状熔嘴进入接头空间, 直抵引弧板凹槽底部。向方形焊口撒入 250g 焊剂。接通电源引弧。电弧将焊剂熔化, 形成渣池, 当渣池达到一定深度时, 提高送丝速度, 使焊丝插入渣池, 转入正常的电渣焊过程。

4. 焊接参数

1) 焊接电流。合适的焊接电流为 500~600A。焊接电流太大, 熔嘴温升过高, 使药皮失去绝缘功能, 一旦钢管与工件接触, 产生电弧而烧坏熔嘴; 焊接电流太小, 生产效率低, 同时容易产生未熔合。

2) 焊接电压。起弧电压较高, 在 50~55V, 此时电流波动较大, 一般在 30~500A。随着焊剂的熔化, 温度升高, 电压下降, 电流增大并渐趋稳定。正常焊接电压为 45~55V, 下部电压较高, 越向上电压要越低, 否则会使焊缝的熔宽由下而上逐步增大。

3) 渣池深度。渣池深度限定在 30~70mm。渣池深度小于 30mm 时, 会使焊接电流、电压降低, 使得电渣焊过程不稳定, 渣池和金属熔池的温度相对降低, 熔宽变窄, 金属熔池上升较快, 如不及时补充焊剂, 渣池深度继续减小, 焊丝就会触及金属熔池发生短路。渣池深度大于 70mm 时, 焊接电流大部分经渣池直接流入母材, 只有少量电流经渣池下部流到金属熔池, 渣池下部温度较低, 金属熔池流动性差, 会使焊缝出现未熔合和夹渣等缺陷。

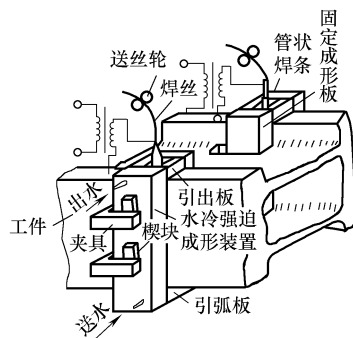


图 4-3-8 双 H 型钢接头电渣焊示意图

3.5.3 高炉炉壳纵缝电渣焊

某一高炉炉体, 炉型为矮胖型, 共有 21 带, 每带由 4~5 块钢板焊接而成。钢板材质为 Q345C

和 Q235C，厚度分别为 40mm、45mm、50mm、64mm、68mm，用卷板设备进行预弯曲。

焊接设备采用 NZ—1000 自动焊机，直流正接。Q345C 钢板采用 $\phi 3\text{mm}$ 、H08Mn2Si 焊丝；Q235C 钢板采用 $\phi 3\text{mm}$ 、H08MnA 焊丝。焊剂采用 HJ431。管极采用 SES—1×4。铜质冷却滑块，内部中空；上下端有输入、输出接头，焊接时通循环水进行冷却，其组装示意图如图 4-3-9 所示。

装配前应将工件的焊接断面和焊缝两侧各 70mm 范围内的铁锈、油污等污物清理干净，保持表面平整光滑。然后在焊缝上端焊接引出板，在焊缝底部焊接引弧板。下口装配间隙 25mm，上口装配间隙 28mm（具体可根据炉壳的高度与厚度进行调节），以防止焊接时收缩变形，引弧板、引出板的厚度同母材一致。将工件按照设定的装配间隙用“门”形卡焊接在一起，管极距引弧板 20～25mm，其装配示意图如图 4-3-10 所示。

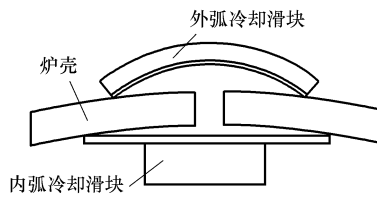


图 4-3-9 高炉炉壳电渣焊冷却滑块组装示意图

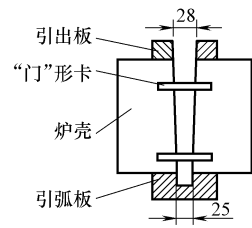


图 4-3-10 高炉炉壳电渣焊装配示意图

高炉炉壳电渣焊焊接参数见表 4-3-2。

表 4-3-2 高炉炉壳电渣焊焊接参数

焊接电流/A	焊接电压/V	送丝速度/(m/h)	渣池深度/mm	熔池深度/mm
500 ~ 600	40 ~ 46	200 ~ 300	40 ~ 50	10 ~ 12

焊接时，将焊丝与焊件接触，加入焊剂 100～200g（焊剂的量应同被焊炉壳的厚度成正比，加入焊剂过多，容易断弧，不利于电弧在开始阶段正常燃烧）。通电将焊丝提起引弧，然后送丝，使电弧保持稳定燃烧。利用电弧热量将不断加入的焊剂迅速熔化，形成 35～55mm 的渣池，再逐步降低电压和送丝速度，进入正常焊接过程。在焊接过程中应注意调节管极在焊件间隙的位置及与滑块的距离。观察冷却滑块对焊件的压紧程度，发现间隙应及时用黏土泥封闭，以免出现漏渣、漏铁液现象，同时注意出水的温度，使其保持在 50～60℃ 范围内。收弧工作在引出板顶部进行，引出长度不小于 40mm，为避免收缩裂纹并填满缩孔，收弧时应降低电压和送丝速度。待焊接自然冷却后，将构件上的“门”形卡及引弧板、引出板用气割清除，并用砂轮磨光。

3.6 带极电渣堆焊

带极电渣堆焊由德国人 Seldel 和 Hess 于 1971 年发明。带极电渣堆焊具有高熔敷率和低稀释率。目前，带极电渣堆焊在造船业、化工压力容器、核容器等制造领域中应用，并开始逐步取代某些常规的堆焊方法，如带极埋弧堆焊和气体保护堆焊等。

3.6.1 带极电渣堆焊的特点

带极电渣堆焊的原理与上述的常规电渣堆焊相似，在堆焊时焊剂堆敷在带极的前侧，熔化后形成一个跟随在带极后面的熔融渣池，电流通过熔渣的电阻热使得连续送进的带极和母材表层的金属熔化，除了利用熔渣的电阻热作热源的差别之外，带极电渣堆焊与带极埋弧堆焊工艺十分相似。带极电渣堆焊的工艺原理如图 4-3-11 所示。

与埋弧堆焊相比，电渣堆焊的电流密度几乎是埋弧堆焊的两倍，在相同的热输入条件下，电渣

堆焊的稀释率仅为埋弧堆焊的一半，而熔敷率则可达到埋弧堆焊的两倍。低稀释率对保持工件表面堆焊层所需要的性能，如耐磨性或耐蚀性是十分有利的。

带极电渣堆焊具有如下特点：熔敷率高，面积覆盖率高，母材熔深浅而均匀；熔渣辐射出可见的红外光谱，没有电弧和紫外辐射，工作条件好；可对熔池进行磁控，因而可得到非常规则的焊道截面，具有光滑的表面和焊道间良好的搭边；由于对熔池进行磁控以及熔渣的结晶温度范围较窄，所以能在尺寸范围很大的曲面及平面上进行堆焊；适合于堆焊耐腐蚀和耐磨金属；使用的焊带宽度为 30 ~ 300mm。

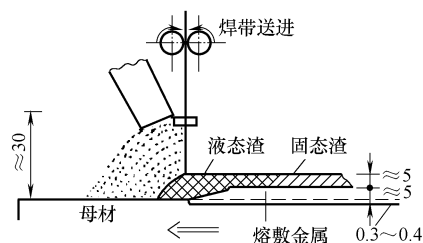


图 4-3-11 带极电渣堆焊的工艺原理

3.6.2 带极电渣堆焊设备和材料

1. 弧焊电源

电渣堆焊工艺除了热源是熔渣的电阻热外，其他方面与埋弧堆焊工艺十分相似。因此可以将一般的埋弧堆焊焊机改造成电渣堆焊焊机。由于电渣堆焊采用较高的电流密度。所以电源容量应足够大。如 60mm × 0.5mm 带极，焊接电流 1500A，100% 暂载率；90mm × 0.5mm 带极，焊接电流 2000A，100% 暂载率；120mm × 0.5mm 带极，焊接电流达 2500A，100% 暂载率。

弧焊电源采用恒压特性的直流电源。堆焊时采用直流反接，对于容量较小的电源，可采用并联连接，以获得足够的电流。

2. 焊接材料

(1) 带极 电渣堆焊具有稀释率低的特点，为了获得特定成分和性能的堆焊层，与埋弧堆焊带极相比，所用带极的化学成分有所不同，一般第一层堆焊使用合金含量高的带极，以降低母材的稀释影响。按照所要求的堆焊层类型和厚度，可采用单层堆焊，也可采用多层堆焊。

(2) 焊剂 带极电渣堆焊的热量来源于导电熔渣的电阻热，所以熔渣的导电性是建立稳定堆焊过程的一个关键因素。焊剂中添加氟化物可以增加熔渣的导电性，电渣堆焊焊剂中含有大量的氟化物和氧化物，如 CaF_2 、 NaF 、 Na_3AlF_6 和 AlF_3 或 TiO_2 和 FeO 。电渣堆焊焊剂的导电性要比普通埋弧堆焊高 5 ~ 6 倍，但是焊剂中氟化物含量的增加会使熔渣的粘度降低。

焊剂中应保持较低的 SiO_2 含量，以防止产生 SiF_4 气体。焊剂颗粒尺寸控制在 0.28 ~ 1.00mm (18 ~ 60 目)，即最少 90% 的焊剂要通过 18 目 (约 1mm)，最多 10% 的焊剂通过 60 目 (约 0.28mm)，而典型埋弧堆焊焊剂颗粒尺寸一般在 0.45 ~ 1.42mm (14 ~ 40 目)。

(3) 带极电渣堆焊焊接参数 主要焊接参数如下：

1) 焊接电流：在带极电渣堆焊中电流是控制带材熔化速度的一个最重要的参数。熔敷速度和熔深随电流增大而线性增加，即在给定电压和焊接速度的前提下，随着焊接电流的增加，熔敷率增加，熔深、焊道宽度和厚度也随之增加，由于稀释率取决于熔敷率和熔深，综合效果是导致稀释率略有降低。在某一电流范围内，可达到平稳的堆焊过程，如对于 60mm × 0.5mm 带极，焊接电流在 1100 ~ 3000A 之间；对于 90mm × 0.5mm 带极，焊接电流在 1650 ~ 4500A 之间。焊接电流过大，在低电压时容易产生短路或在高电压下产生飞溅；焊接电流过小，则堆焊层易产生咬边。

2) 焊接电压：焊接电压也是带极电渣堆焊的一个重要参数。电压控制着带极进入渣池的深度，由于渣池的深度一般较浅 (3 ~ 6mm)，所以要达到稳定的堆焊条件，焊接电压必须保持在一个很窄的范围内。低于 24V 时，带极容易粘在基本金属上，导致短路；高于 28V 时，带极会在焊剂表面燃弧，飞溅增加。焊接电压通常为 24 ~ 28V。随着焊接电压增加，熔深、焊道宽度和厚度增加，熔敷率随电压的升高稍有增加，稀释率略有下降。

3) 焊接速度: 只有当熔融的渣池和带极之间保持足够的接触面积时, 电渣堆焊过程才能稳定。焊接速度对堆焊焊道几何形状和稀释率有很大的影响。焊接速度过快会造成带极与未经充分加热过的渣相接触, 导致断续的埋弧燃弧和焊接过程的不稳定; 同时速度过快使堆焊层厚度低于4mm, 会引起咬边。焊接速度过慢, 而使堆焊层厚度高于6mm, 堆焊层金属对基体的润湿角过陡, 在焊道搭边处容易引起夹渣; 焊接速度增加, 焊道宽度和堆焊层厚度降低, 熔深和稀释率增加。最佳焊接速度范围为152~203mm/min, 对应的稀释率约为11%。

4) 带极伸出长度: 带极伸出长度可在25~40mm之间变化而不影响工艺稳定性, 对焊道几何形状、熔深、稀释率和熔敷率的影响不是很大。

5) 焊剂堆敷层厚度: 通常焊剂层厚度应该大于带极伸出长度0~5mm。焊剂堆敷层厚度增加, 稀释率和焊剂消耗将有适当增加, 飞溅减小。焊剂堆敷层厚度一般为30~35mm。

6) 焊道搭边量: 为了得到平整的焊道表面, 应严格控制焊道搭边量、焊道厚度和边缘润湿角度。焊道越厚, 润湿角越陡, 所需搭边量就越小, 对厚4~5mm的焊道, 焊道搭边量至少为8~9mm。

7) 带极厚度: 因为带极的电阻与横截面积成反比, 故薄带比厚带产生的热较多。因此, 薄的带极可以在电流值低的情况下产生稍高的熔敷率。随着带极厚度的减小, 熔深稍有降低, 稀释率略有下降, 其原因是对于相同的热输入, 薄的带极所产生的熔敷金属量要比厚的带极多, 但是在较高的电流下采用较厚的带极可以获得更高的生产率。

8) 带极宽度: 电渣堆焊通常使用宽带极以提高生产率。然而, 宽度超过60mm的带极可能造成咬边。在采用相同电流密度情况下, 随着带宽的增加, 熔敷率近似线性地增加。熔敷率的效率(熔敷率除以热输入)随带极宽度的增加而趋于降低, 这是由于带极两侧转化成熔化电极的热能较小, 熔深也随带极宽度的增加而稍有下降, 熔深在堆焊层的两侧稍大些, 因此, 稀释随着带极宽度的增加而减小。

9) 焊带表面粗糙度: 带极表面粗糙度值越小, 则其表面吸附的杂质就越少, 有利于提高堆焊层的质量。

10) 带极和母材的化学成分: 带极的物理特性如电阻率和热焓是化学成分的函数, 电阻率高则热焓变化低, 而使熔敷率高, 熔深浅, 稀释率降低。母材成分对熔深有一定影响。对于同一类型的焊材和母材, 成分的适当变化所产生的影响不是很大。

11) 焊接位置: 带极电渣堆焊的焊接位置即母材的倾斜方向对熔深、稀释率和焊道形状的影响较大, 若母材倾斜角度不当会有产生未熔合的危险。为避免产生未熔合, 平面堆焊熔深应超过5%, 曲面堆焊熔深应超过10%。从下坡焊、平焊到上坡焊, 母材稀释随之增大。与平焊比较, 下坡焊时焊层较薄, 呈凹形, 且焊道较宽, 上坡焊时焊层较厚, 呈凸形, 且焊道较窄。带极电渣堆焊推荐采用平焊和略微倾斜的上坡焊(0°~2°)。但为了进一步降低稀释, 轻微的下坡焊($\geq -1^\circ$)也是可以的。

(4) 外加磁控装置的作用 在带极堆焊(直流反接)过程中, 电流自身磁场产生的电磁力驱使熔渣和熔融金属流动到焊道中心, 这种“收缩效应”导致咬边缺陷, 特别是对于宽度大于60mm的带极。为了得到满意的焊道成形, 可以通过附加外磁场, 产生与焊接电流产生的电磁力方向相反的电磁力来抵消“收缩效应”, 防止咬边的产生。

磁控装置产生的外加磁场方向对焊道成形十分重要, 磁场装置的S极必须位于带极堆焊方向的左侧。外加磁场能够控制熔池的流动方向和速度, 同样也影响焊道宽度、厚度和边缘润湿角, 影响熔深和焊道截面形状。

实际上往往在磁控装置的两线圈中通入不同的电流值, 以获得截面对称、尾部平整或微凹的堆焊焊道, 可以用焊道截面的形状来评判外加磁场强度是否合适。

3.7 振动调制电渣焊

如前所述,电渣焊热输入功率大,致使接头的热影响区和焊缝的组织晶粒粗大,这严重影响了电渣焊接头的力学性能,也在一定程度上限制了电渣焊在工业上的使用和推广。振动调制(又称随焊振动)是在振动时效基础上发展起来的一项焊接工艺,它是在正常的焊接过程中给焊件施加周期性的外力,即使焊件振动。研究发现:振动调制焊接可以有效地细化晶粒,提高焊接接头的整体性能,将振动调制工艺应用于电渣焊中,形成了振动调制电渣焊。

电渣焊接头形成过程实际上是焊缝金属凝固的过程。在焊接过程中对熔池施加振动,势必增加熔池中液态金属的对流,这是一种利用外力的对流,即强制对流。众所周知焊接熔池的热量传输主要依靠对流和热传导两种方式,在金属凝固过程中强制对流能促进温度的均匀化,降低焊缝处的温度梯度和促使过热组织的消失。由于振动加速熔池金属的传热过程,使得熔合线处的温度传输加速,降低了该处的温度梯度,在一定程度上抑制枝状晶的长大,细化晶粒。另外,振动还可以碎化已经形成的枝状晶而获得大量的结晶核心,振动在强迫枝间液体流动的过程中促进了溶质的均化,减少了熔合区的成分偏析。同时振动使得在结晶过程中气泡、杂质等容易上浮,促使一些杂质和气体析出。这在一定程度上改善了焊接接头的组织和性能。

一般认为焊缝区和热影响区晶粒粗大是电渣焊力学性能,特别是侧弯性能不佳的根本原因,通过振动调制工艺,在一定程度上细化了焊缝和热影响区的晶粒,从而使侧弯性能明显上升。研究结果表明,振动调制电渣焊提高了焊接接头的侧弯性能和热影响区的冲击韧度值,振动调制还在热状态下通过热塑性变形调整,从而降低残余应力,这能有效地防止焊接裂纹的形成和工件的变形,对提高构件的疲劳寿命,改善焊缝的综合性能有一定的影响。

振动调制工艺效果决定于其振动参数,包括振动幅度、振动频率、振动时间等,合适的振动参数可以得到最佳的接头性能,因此合理地选取振动参数对振动调制效果是极为重要的。除了采用电磁振动的方法之外,还可以用超声波振动实现对焊缝熔池的振动或搅拌。

参考文献

- [1] 陈茂爱,王新洪,陈俊华,等. 现代焊接技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [2] 上海市焊接学会, 上海市焊接协会. 现代焊接生产实用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 祁东军, 尹伟, 隋晓玲. 应用于箱形柱制造的熔嘴式电渣焊技术 [J]. 焊接技术, 2010, 39 (5): 65-69.
- [4] 石成. 熔嘴电渣焊技术在大型箱形钢构件加工中的应用 [J]. 建筑施工, 2010, 32 (7): 671-673.
- [5] 张学兵. 高层钢结构箱形柱制作的焊接工艺控制 [J]. 焊接技术, 2009, 38 (6): 56-58.
- [6] 杨宇泽. 电渣焊在制作箱型构件中的应用 [J]. 包钢科技, 2006, 32 (4): 10-12.
- [7] 范绍林, 刘兴文, 韩丽娟, 等. 建筑钢结构箱形钢梁(柱)隔板熔嘴电渣焊工艺方法 [J]. 机械工人: 热加工, 2007 (7): 30-32.
- [8] 边振义. 建筑钢结构箱表构件隔板的电渣焊接 [J]. 焊接技术, 1998 (5): 35-36.
- [9] 朱光照. 重型厂房柱子的管状焊条丝极电渣焊 [J]. 焊接, 1990 (1): 16-18.
- [10] 朱光照. 超高层建筑箱型柱的熔嘴电渣焊 [J]. 焊接, 1990 (6): 10-14.
- [11] 刘连生, 尹伟, 盖永钢. 电渣焊在 5#、60#高炉炉壳纵缝焊接中的应用 [J]. 电焊机, 2003, 33 (4): 44-46.
- [12] 姜雷, 苏会德, 杨吉广, 等. 熔嘴电渣焊在莱钢高炉炉壳立缝焊接中的应用 [J]. 山东冶金, 2004, 26 (5): 17-19.
- [13] 王家淳, 孙敦武. 超低碳 20—10 型不锈钢带极电渣堆焊工艺的优化 [J]. 焊接学报, 1997, 18 (3):

171-176.

- [14] 张茂龙, 孙礼兵. 带极电渣堆焊工艺及其应用 [J]. 锅炉技术, 1993 (8): 21-26.
- [15] 孙松年. 造船用低稀释电渣堆焊 [J]. 造船技术, 1991 (6): 22-27, 16.
- [16] 朱政强, 陈立功, 饶德林, 等. 振动调制工艺在高炉用钢电渣焊中的应用 [J]. 焊接学报, 2005, 26 (2): 56-58, 63.
- [17] 朱政强, 陈立功, 饶德林, 等. 振动调制工艺改善电渣焊接头性能的研究 [J]. 中国机械工程, 2004, 15 (22): 2051-2054.

第4章 气焊、气割与高压水射流切割

本章在介绍气焊与气割基本概念的基础上，详细介绍了气焊工艺、气焊材料、气割工艺及设备，阐述了气焊与气割的基本原理，并对气焊、气割工艺规范进行了讲述，着重介绍了气焊、气割的分类及相关参数的选定。此外，还对高压水射流切割工作原理、水射流切割分类、工艺特点、工艺参数以及应用范围等进行了介绍，给出了纯水型高压水射流切割非金属材料的代表性工艺参数和非金属材料的加磨料型高压水射流切割的工艺参数规范。

4.1 气焊

气焊使用的焊接材料主要包括可燃气体、助燃气体、焊丝、气焊熔剂等。助燃气体主要为氧气，可燃气体主要采用乙炔、液化石油气等。气焊设备主要包括氧气瓶、乙炔瓶（如采用乙炔作为可燃气体）、减压器、焊枪、回火保险器、胶管等。由于储存气体的气瓶属于压力容器、气体为易燃易爆物质，所以气焊是所有焊接方法中危险性最高的方法之一。

最常用的是氧乙炔焊，即利用乙炔和氧混合燃烧时所产生的氧乙炔焰，来加热熔化焊件与焊丝，冷凝后形成焊缝的焊接方法。乙炔利用纯氧助燃，与在空气中相比，能大大提高火焰温度（达3000℃以上）。

气焊的主要优点如下：

- 1) 设备简单、使用灵活。
- 2) 对铸铁及某些有色金属的焊接有较好的适应性。
- 3) 在电力供给不足或无电力供给的地方需要焊接时，气焊可以发挥更大的作用。

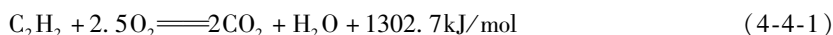
在电弧焊广泛应用之前，气焊在许多工业部门是一种比较广泛应用的焊接方法。在电弧焊、CO₂气体保护焊、激光焊等先进的焊接方法迅速发展和广泛应用的情况下，由于焊件加热速度慢，生产效率低，焊接热影响区宽，焊件变形大，气焊的应用范围越来越小。目前，气焊主要用于焊接厚度小于3mm以下的低碳钢薄板，铜、铝等有色金属及其合金，以及铸铁的补焊等。

4.1.1 气焊工艺

1. 气焊火焰

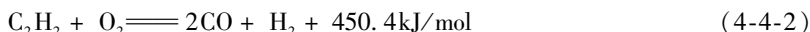
气焊所用的燃气主要有乙炔、丙烷、丙烯、氢气、煤气等。乙炔是传统的燃气，一直在气焊中占主导地位。目前，虽然有许多的乙炔替代气体，但焊割效果都不如乙炔，均未能广泛应用。本节主要介绍氧乙炔焊。

乙炔完全燃烧的化学反应方程式如下：

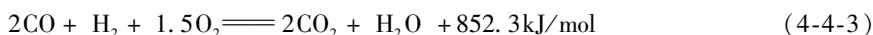


对在焊嘴出口处形成的气焊火焰来说，基本按以下化学反应方程式进行燃烧。

通过焊炬参加反应的氧：



通过周围空气参加反应的氧：



乙炔（C₂H₂）在氧气（O₂）中的燃烧过程可以分为两个阶段：首先乙炔在加热作用下被分解

为碳 (C) 和氢 (H_2)，碳和混合气中的氧发生反应生成一氧化碳 (CO)，形成第一阶段的燃烧；随后第二阶段的燃烧是依靠空气中的氧进行的，此时一氧化碳和氢气分别与氧发生反应分别生成二氧化碳 (CO_2) 和水 (H_2O)。上述乙炔在氧气中燃烧的过程是一个放热的过程。

1 体积的乙炔与由焊炬提供的 1 体积的氧燃烧产生的火焰叫做中性焰。但是，由于一小部分氢与混合气中的氧燃烧成为水蒸气，以及氧不纯的缘故，所以实际上由焊炬提供的氧要稍多一些，即达到氧与乙炔的体积比为 1.1 ~ 1.2 时才能形成中性焰。中性焰具有轮廓明显的焰心，应用最广。气焊低碳钢、中碳钢、低合金钢、纯铜、锡青铜、铝及铝合金、铅、锡、镁合金等一般用中性焰。

当氧与乙炔的混合比例小于 1.1 时，火焰变成碳化焰。碳化焰的焰心轮廓不如正常焰明显。碳化焰具有较强的还原作用，也有一定的渗碳作用。轻微碳化的碳化焰适用于气焊高碳钢、高速钢、硬质合金钢、蒙乃尔合金钢、碳化钨和铝青铜等。

当氧与乙炔的混合比例大于 1.2 时，火焰变成氧化焰，焰心呈圆锥体形状。氧气过剩时由于氧化较强烈，火焰的中层和火舌的长度都大为缩短。燃烧时带有噪声，噪声的大小取决于氧的压力和火焰中混合气体的比例。混合气中氧含量越多，噪声越大。轻微氧化的氧化焰适用于气焊黄铜、锰黄铜、镀锌薄钢板等，可减少锌的蒸发。氧乙炔焰的构造和形状如图 4-4-1 所示。

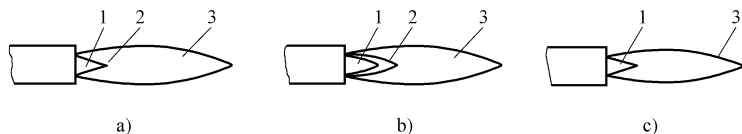


图 4-4-1 氧乙炔焰的构造和形状

a) 中性焰 b) 碳化焰 c) 氧化焰

1—焰心 2—内焰 3—外焰

(1) 焰心 中性焰的焰心呈尖锥形，色白而明亮，轮廓清晰。焰心由高温氧气和乙炔构成，焰心的外表分布着一层由乙炔分解所生成的碳素微粒，炽热的碳粒发出明亮的白光，因而焰心有明亮而清晰的轮廓。

在焰心表面进行着第一阶段的燃烧。焰心虽然很亮，但温度较低 ($800 \sim 1200^{\circ}\text{C}$)，这是由于乙炔分解而吸收了部分热量的缘故。

(2) 内焰 内焰主要由乙炔的不完全燃烧产物，即来自焰心的碳和氢气与氧气燃烧的生成物一氧化碳和氢气所组成。内焰位于碳素微粒层外面，呈蓝白色，有深蓝色线条。内焰处在焰心前 2 ~ 4mm 部位，燃烧激烈，温度最高，可达 $3100 \sim 3150^{\circ}\text{C}$ 。气焊时，一般利用这个温度区域进行焊接，因而称为焊接区。

由于内焰中的一氧化碳 (CO) 和氢气 (H_2) 能起还原作用，所以焊接碳钢时都在内焰进行，将工件的焊接部位放在距焰心尖端 2 ~ 4mm 处。内焰中的气体中一氧化碳的体积分数占 60% ~ 66%，氢气的体积分数占 30% ~ 34%，由于对许多金属的氧化物具有还原作用，所以焊接区又称为还原区。

(3) 外焰 处在内焰的外部，外焰的颜色从里向外由淡紫色变为橙黄色。在外焰，来自内焰燃烧生成的一氧化碳和氢气与空气中的氧充分燃烧，即进行第二阶段的燃烧。外焰燃烧的生成物是二氧化碳和水。

外焰温度为 $1200 \sim 2500^{\circ}\text{C}$ 。由于二氧化碳 (CO_2) 和水 (H_2O) 在高温时容易分解，所以外焰具有氧化性。氧乙炔火焰离开焰心前端不同距离的火焰温度见表 4-4-1，各种金属材料气焊火焰的选择见表 4-4-2。

2. 气焊焊接参数

气焊的焊接参数包括接头形式和坡口尺寸、焊丝牌号和直径、气焊熔剂、火焰种类、火焰能

率、焊炬型号和焊嘴的号码、焊嘴倾角和焊接速度等。由于焊件的材质、焊件的形状尺寸和焊接位置、工作条件、焊工的操作习惯和气焊设备等的不同，所选用的气焊焊接参数不尽相同。

表 4-4-1 离开焰心前端不同距离的火焰温度

离开焰心前端的距离/mm	温度/℃
3	3050 ~ 3150
4	2850 ~ 3050
11	2650 ~ 2850
25	2450 ~ 2650

表 4-4-2 各种金属材料气焊火焰的选择

焊件材料	应用火焰	焊件材料	应用火焰
低碳钢	中性焰或轻微碳化焰	铬镍不锈钢	中性焰或轻微碳化焰
中碳钢	中性焰或轻微碳化焰	纯铜	中性焰
低合金钢	中性焰	锡青铜	轻微氧化焰
高碳钢	轻微碳化焰	黄铜	氧化焰
灰铸铁	碳化焰或轻微碳化焰	铝及其合金	中性焰或轻微碳化焰
高速钢	碳化焰	铅、锡	中性焰或轻微碳化焰
锰钢	轻微氧化焰	蒙乃尔合金	碳化焰
镀锌铁皮	轻微碳化焰	镍	碳化焰或轻微碳化焰
铬不锈钢	中性焰或轻微碳化焰	硬质合金	碳化焰

(1) 焊丝的直径 应根据焊件的厚度、坡口的形式、焊缝位置、火焰能率等因素确定。在火焰能率一定，即焊丝熔化速度确定时，如果焊丝过细，则焊接时往往焊件尚未熔化，焊丝已熔化下滴，容易造成熔合不良和焊缝高低不平、焊缝宽窄不一等缺陷；如果焊丝过粗，则熔化焊丝所需要的加热时间就会延长，同时增大了对焊件的加热范围，使焊件焊接热影响区增大，组织过热，降低焊接接头的质量。

应根据焊件厚度初步选择焊丝直径，试焊后再调整。选择焊丝直径时可参考表 4-4-3。

表 4-4-3 气焊焊丝直径的选择

工件厚度/mm	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 15	> 15
焊丝直径/mm	1 ~ 2	2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 6	6 ~ 8

在多层焊时，第一、二层应选用较细的焊丝，以后各层可采用较粗的焊丝。一般平焊应比其他焊接位置选用粗一号的焊丝，右焊法比左焊法选用的焊丝要适当粗一些。

(2) 火焰能率 火焰能率指单位时间内可燃气体的消耗量，单位为 L/h，其物理意义是指单位时间内可燃气体所提供的能量。

火焰能率的大小由焊炬型号和焊嘴号码大小决定。焊嘴号越大火焰能率也越大。火焰能率的大小通过氧、乙炔混合气体中氧气的压力和流量（消耗量）和乙炔的压力和流量（消耗量）来调节。流量的粗调通过更换焊炬型号和焊嘴号码实现；流量的细调通过调节焊炬上的氧气调节阀和乙炔调节阀来实现。

火焰能率应根据焊件的厚度、材料的熔点和导热性及焊缝的空间位置来选择。比如焊接较厚的焊件、熔点较高的金属以及导热性较好的铜、铝及其合金时，要选用较大的火焰能率，才能保证焊件焊透；反之，在焊接薄板时，为防止焊件被烧穿，火焰能率应适当减小。平焊缝可比其他位置焊缝选用稍大的火焰能率。实际生产中，在保证焊接质量的前提下，应尽量选择较大的火焰能率。

焊接厚的焊件应选用孔径较大的焊嘴。对于不同厚度的钢板，焊炬和焊嘴的选择可参照表 4-4-4 与表 4-4-5。

表 4-4-4 射吸式焊炬型号及其参数

型号	焊接低碳钢厚度/mm	氧气工作压力/MPa	乙炔使用压力/MPa	可换喷嘴个数
H01-2	0.5~2	0.1~0.25	0.001~0.10	5
H01-6	2~6	0.2~0.4		
H01-12	6~12	0.4~0.7		
H01-20	12~20	0.6~0.8		

表 4-4-5 等压式焊炬型号及其参数

型号	焊接低碳钢厚度/mm	焊嘴号	孔径/mm	氧气工作压力/MPa	乙炔工作压力/MPa
H02-12	0.5~12	1	0.6	0.2	0.02
		2	1.0	0.25	0.03
		3	1.4	0.3	0.04
		4	1.8	0.35	0.05
		5	2.2	0.4	0.06
H02-20	0.5~20	1	0.6	0.2	0.02
		2	1.0	0.25	0.03
		3	1.4	0.3	0.04
		4	1.8	0.35	0.05
		5	2.2	0.4	0.06
		6	2.6	0.5	0.07
		7	3.0	0.6	0.08

(3) 火焰性质 火焰性质应根据焊接材料的种类和性能进行选择。一般来说，当需要减少元素的烧损时，应选用中性焰；当需要增碳及还原气氛时，应选用碳化焰；当母材中含有低沸点元素（如锡、锌等），需要在熔池表面生成氧化物薄膜以阻止低熔点元素蒸发时，应选用氧化焰。

由于气焊焊接质量和焊缝金属的强度与火焰种类有很大的关系，在整个焊接过程中应注意（不断地）调节火焰成分，保持火焰的性质不变。

(4) 焊嘴倾角 焊嘴的倾角是指焊嘴中心线与焊件平面之间的夹角。当焊嘴垂直于焊件表面（90°夹角）时，火焰热量最集中，焊件吸收的热量最大，升温快；随着焊嘴的倾斜角减小（夹角小于90°），焊件吸收的热量也随之下降，倾斜角越小，焊件吸收的热量越少，升温就越慢。对于不同材料、不同厚度的焊件，应选择不同的焊嘴倾角。通常情况下，对于熔点高、导热性好、厚度较大的焊件，应使焊嘴的倾角要选得大一些；反之，焊嘴倾角可选得小一些。焊嘴倾角与焊件厚度的关系如图 4-4-2 所示。

焊嘴的倾角在气焊的过程中还应根据施焊情况进行相应的变化。如在焊接刚开始时，为了迅速形成熔池，采用焊嘴的倾斜角度为 80°~90°；当焊接结束时，为了更好地填满弧坑和避免焊穿和焊缝收尾处过热，应将焊嘴适当提高，焊嘴倾斜角度逐渐减小，并使焊嘴对准焊丝或熔池交替地加热。

(5) 焊接方向 气焊时，所指的焊接方向有两种：一种是从右向左施焊（火焰指向焊接方向），称为左焊法；另一种是从左向右施焊（火焰指向焊接反方向），称为右焊法，如图 4-4-3 所示。在通常情况下，左焊法适用于焊接较薄的工件；右焊法适用于焊接较厚的工件。

(6) 焊接速度 在保证焊接质量的前提下，尽量提高焊接速度，以减少焊件的受热程度并提高生产率。一般说来，对于厚度大、材料熔点高的焊件，焊接速度要慢些，以避免产生未熔合的缺

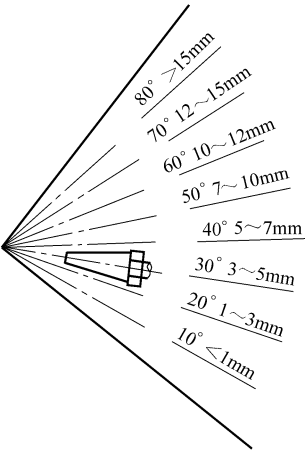


图 4-4-2 焊嘴倾角与焊件厚度的关系

陷；而对于厚度薄、材料熔点低的焊件，焊接速度要快些，以避免产生烧穿和使焊件过热而降低焊接质量。

(7) 接头形式和坡口形式 气焊常采用对接接头、角接接头、卷边接头和搭接接头。由于气焊往往用于薄板焊件的焊接，对接接头又分为开 I 形坡口和开 V 形坡口接头。

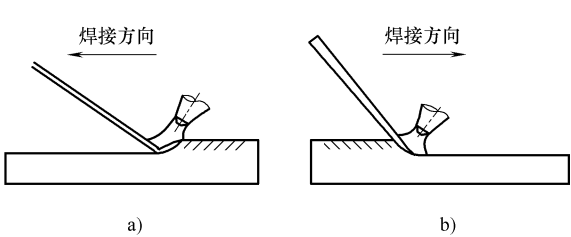


图 4-4-3 焊接方向

a) 左焊法 b) 右焊法

4.1.2 气焊材料

1. 焊丝

焊丝熔化进入熔池成为焊缝金属的一部分。焊丝的化学成分直接影响到焊接质量和焊缝的力学性能。因此，应根据工件的化学成分或焊接接头使用强度级别选用相应成分和强度级别的焊丝。表 4-4-6 列出了铸铁气焊丝的牌号和主要化学成分。

表 4-4-6 铸铁气焊丝的牌号和主要化学成分

牌号	名称	化学成分(质量分数,%)					
		C	Si	Mn	S	P	Σ Re
HS401	灰铸铁气焊丝	3.0~4.2	2.8~3.6	0.3~0.8	≤0.08	≤0.5	—
HS402	球墨铸铁气焊丝	3.0~4.2	3.0~3.6	0.5~0.8	≤0.05	≤0.5	0.08~0.15

常用气焊丝的型号和用途如下：

(1) 结构钢焊丝 一般低碳钢焊件采用的焊丝有 H08A；重要的低碳钢焊件用 H08Mn 和 H08MnA；中强度焊件用 H15A；强度较高的焊件用 H15Mn。

焊接强度等级为 300~350MPa 的普通碳素结构钢时，采用 H08A、H08Mn 和 H08MnA 等焊丝。

焊接优质碳素钢和低合金结构钢时，可采用碳素结构钢焊丝或合金结构钢焊丝，如 H08Mn、H08MnA、H10Mn2 及 H10Mn2MoA 等。

(2) 合金钢、有色金属、铸铁用焊丝 其型号、化学成分可参见相关国家标准：GB/T 10858—1989《铝合金焊丝》，GB/T 15620—1995《镍合金焊丝》，GB/T 9460—1988《铜合金焊丝》，GB/T 10044—1988《铸铁焊丝》。

2. 气焊熔剂

气焊熔剂又叫做助熔剂，其作用是去除氧化物。气焊过程中，熔化金属中的一些合金元素极易与周围空气中的氧或火焰中的氧化合生成氧化物，如 FeO、Cr₂O₃、ZrO₂、Al₂O₃ 和 SiO₂ 等，使焊缝中产生气孔和夹渣等缺陷。在焊接有色金属、不锈钢以及铸铁等材料时必须使用气焊熔剂，如硼砂、硼酸等，与上述氧化物反应生成低熔点的熔渣，以利于浮出熔池。低碳钢气焊时不需要熔剂。常用气焊熔剂的牌号及其用途见表 4-4-7。

表 4-4-7 常用气焊熔剂的牌号及用途

牌号	名称	用途
CJ101(气剂 101)	不锈钢及耐热钢气焊熔剂	不锈钢及耐热钢气焊
CJ201(气剂 201)	铸铁气焊熔剂	铸铁气焊
CJ301(气剂 301)	铜气焊熔剂	铜及铜合金气焊
CJ401(气剂 401)	铝气焊熔剂	铝及铝合金气焊

4.2 气割工艺及设备

气割是利用气体火焰的热能将工件切割处预热到一定温度（燃烧点）后，切割孔中喷出高速

切割氧流,使切割处的金属燃烧,成为熔融的金属氧化物,同时利用高压氧气流吹掉切口内的金属氧化物,形成切口。

割炬与焊炬不同,割炬外观及其割嘴结构截面图如图4-4-4所示。割炬比焊炬多一根切割氧气管和一个切割氧阀门。割炬下面一根铜管是预热焰混合气体管道,上面一根铜管是切割氧气管道。此外,割嘴与焊嘴的构造也不同,割嘴的出口有两个通道,中间的通孔是切割氧流(纯氧)的出口,其外围的环形孔或环形分布的孔是氧乙炔混合气体的出口。割嘴有环形和梅花形两种,分别如图4-4-4a和b所示。常用的割炬型号有G01—30、G01—100和G01—300等。其中“G”表示割炬,“0”表示手工,“1”表示射吸式,“30”表示最大气割厚度为30mm。同焊炬一样,各种型号的割炬均配备几个不同规格的割嘴。

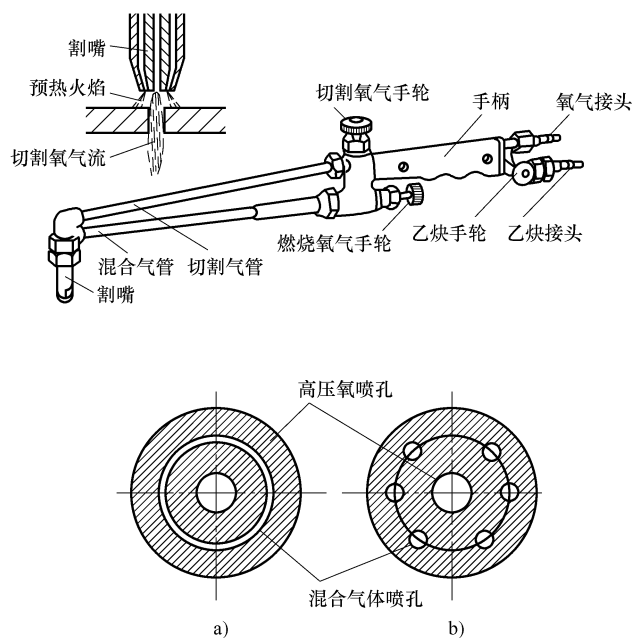


图4-4-4 割炬外观及其割嘴结构截面图

a) 环形割嘴 b) 梅花形割嘴

4.2.1 气割的基本原理

气割是利用可燃气体与氧气混合燃烧的火焰,将工件被切割处的金属加热到燃烧点温度,从切割孔中喷出高速切割氧流,使加热处的金属发生剧烈的氧化(燃烧),并利用高压氧气流吹掉割口内的金属氧化物,将金属分开,随着割炬的移动,形成一条连续的切口。可见,气割与气焊在原理上是完全不同的,气焊过程本质上是“熔化”,而气割过程本质上是“氧化”。归纳起来,低碳钢的氧乙炔焰气割过程包括预热、燃烧、吹渣三个阶段。

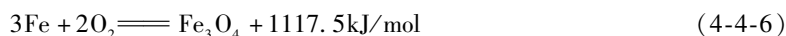
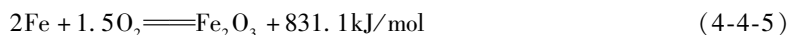
(1) 预热 气割开始时,利用氧乙炔焰或氧丙烷焰将工件切割处预热到能发生剧烈氧化的温度(燃点)。

(2) 燃烧 切割孔中喷出高速切割氧流,使已预热的金属开始燃烧,由于氧化过程是放热反应,产生的热量能够使与切割焰毗邻的金属熔化,从而使燃烧过程得以连续进行。

(3) 吹渣 金属燃烧在切口中形成熔融金属氧化物,必须利用高速切割氧流即时吹掉,否则阻碍切割过程连续进行,影响切口质量。燃烧产生的热量和预热火焰产生的热量同时将切口邻近的

金属预热到所需温度。

钢气割过程中的氧化反应有：



上述三种反应几乎可以同时进行，反应速度非常快，在切割反应区将生成三种铁的氧化物，并放出大量的热量。

4.2.2 气割工艺

气割所用的可燃气体主要有乙炔、天然气、丙烷、液化石油气等。

1. 氧乙炔切割

(1) 乙炔性质 乙炔在纯氧中燃烧的火焰温度可达3100℃以上，是气割用燃气中温度最高的，使用最广。乙炔在常温常压下是无色无味的气体，着火点335℃；相对分子量26.038，标准状况下，密度1.16g/L，比空气轻；微溶于水，易溶于有机溶剂。乙炔燃烧的反应方程式见式(4-4-1)。

(2) 气割工艺参数 气割工艺参数主要包括割炬型号和切割氧压力、切割速度、预热火焰能率、割嘴与工件间的倾斜角、割嘴离工件表面的距离等。

1) 割炬型号和切割氧压力：工件越厚，割炬型号、割嘴号码、氧气压力均应增大，氧气压力与割件厚度、割炬型号、割嘴号码的关系见表4-4-8。

2) 切割氧压力：切割氧的压力不能过低，也不能过高。若切割氧压力过高，则使切口过宽，切割速度降低，不仅浪费氧气，同时还会使切口表面粗糙，还对割件产生强烈的冷却作用。当割件较薄时，切割氧压力可适当降低，但不能过低，若氧气压力过低，会使气割过程中的氧化反应减慢，切割产生的熔渣吹不掉，在切口背面形成难以清除的熔渣粘物，甚至不能将工件割穿。

3) 氧气纯度：除了切割氧压力的影响外，氧气的纯度对氧气消耗量、切口质量和切割速度也有很大影响。氧气纯度降低，会使金属氧化过程缓慢、切割速度降低，同时氧的消耗量增加。氧气纯度对气割时间和氧气消耗量的影响曲线，如图4-4-5为所示。在氧气纯度为97.5%~99.5%（体积分数）的范围内，氧气纯度每降低1%（体积分数）时，切割1m长的切口，气割时间将增加10%~15%；氧气消耗量将增加25%~35%。

氧气中的杂质如氮等在气割过程中会吸收热量，并在切口表面形成气体薄膜，阻碍金属燃烧，从而使切割速度下降和氧气消耗量增加，并使切口表面粗糙。气割用的氧气的纯度应尽可能地提高，一般要求在99.5%（体积分数）以上。若氧气的纯度降至95%（体积分数）以下，气割过程将很难进行。

4) 切割速度：一般切割速度与工件的厚度和割嘴形式有关。工件越厚，切割速度越慢，反之，切割速度应提高。合适的切割速度既可以保证切口质量，又能降低氧气的消耗量。切割速度由操作者根据切口的后拖量自行掌握。所谓后拖量，是指在氧气切割的过程中，在切割面上的切割氧气流轨迹的始点与终点在水平方向上的距离，如图4-4-6所示。

在气割时，后拖量总是不可避免的，尤其气割厚板时更为显著。合适的切割速度，应以使切口产生的后拖量比较小为原则。若切割速度过慢，会使切口边缘不齐，甚至产生局部熔化现象，割后清渣也较困难；若切割速度过快，会造成后拖量过

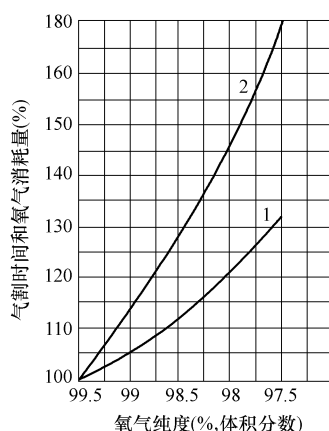


图4-4-5 氧气纯度对气割时间和氧气消耗量的影响曲线

1—对切割时间的影响

2—对氧气消耗量的影响

大，使切口不光洁，甚至造成割不透。

5) 预热火焰能率：预热火焰的作用是把金属工件加热至金属在氧气中燃烧的温度，并始终保持这一温度，同时还使钢材表面的氧化皮剥离和熔化，便于切割氧流与金属接触。气割时，预热火焰应使用中性焰或轻微氧化焰。碳化焰会使切口边缘增碳，不宜采用。预热火焰能率的大小与工件的厚度有关，工件越厚，火焰能率应越大，但在气割时应防止火焰能率过大或过小的情况发生。如在气割厚钢板时，由于切割速度较慢，为防止切口上缘熔化，应相应使火焰能率降低；若此时火焰能率过大，会使切口上缘产生连续珠状钢粒，甚至熔化成圆角，同时造成切口背面粘附熔渣增多，影响切割质量。如在气割薄钢板时，因切割速度快，可相应增加火焰能率，但割嘴应离工件远些，并保持一定的倾斜角度；若此时火焰能率过小，使工件得不到足够的热量，就会使切割速度变慢，甚至使切割过程中断。

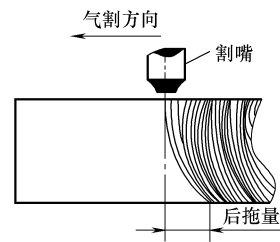


图 4-4-6 后拖量示意图

6) 割嘴与工件间的倾角：割嘴倾角应根据工件的厚度来确定。一般，切割厚度小于 4mm 的钢板时，割嘴后倾 25°~45°；切割 4~20mm 厚的钢板时，割嘴后倾 20°~30°；切割 20~30mm 厚的钢板时，割嘴则应垂直于工件；切割厚度大于 30mm 的钢板时，开始气割时应将割嘴前倾 20°~30°，待割穿后再将割嘴垂直于工件进行切割，当快割完时，割嘴应逐渐向后倾斜 20°~30°。割嘴与工件间的倾角，如图 4-4-7 所示。

割嘴与工件间的倾角对切割速度和后拖量产生直接影响，如果倾角选择不当，不但不能提高切割速度，反而会增加氧气的消耗量，甚至造成气割困难。

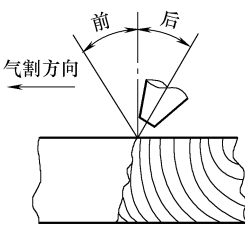


图 4-4-7 割嘴与工件间的倾角示意图

7) 割嘴离工件表面的距离：通常应使焰心尖端与工件表面的距离保持在 3~5mm，在此条件下加热效率最高，工件渗碳的可能性最小。如果焰心触及工件表面，不仅会引起切口上缘熔化，还会使切口渗碳的可能性增加。

一般来说，切割薄板时，由于切割速度较快，火焰可以长些，割嘴离开工件表面的距离可以大些；切割厚板时，由于切割速度慢，为了防止切口上缘熔化，预热火焰应短些，割嘴离工件表面的距离可适当小些，这样可以保持切割氧流的挺直度和氧气的纯度，使切割质量得到提高。

氧-乙炔气割割炬分为射吸式割炬和等压式割炬。射吸式割炬大多用于手工切割，切割低碳钢时的工艺参数见表 4-4-8；等压式割炬大多用于机器切割，切割低碳钢时的工艺参数见表 4-4-9。

表 4-4-8 射吸式割炬切割工艺参数

型号	割嘴号码	割嘴形式	切割低碳 钢厚度/mm	切割氧孔 径/mm	气体压力/MPa		气体消耗量/(L/min)	
					氧气	乙炔	氧气	乙炔
G01—30	1	环形	3~10	0.7	0.2	0.001~ 0.1	13.3	3.5
	2		10~20	0.9	0.25		28.3	4.0
	3		20~30	1.1	0.3		36.7	5.2
G01—100	1	梅花形	10~25	1.0	0.3		36.7~45	5.8~6.7
	2		25~50	1.3	0.4		58.2~71.7	7.7~8.3
	3		50~100	1.6	0.5		91.7~121.7	9.2~10
G01—300	1	梅花形	100~150	1.8	0.5		130~150	11.3~13
	2		150~200	2.2	0.65		183~233	13.3~18.3
	3		200~250	2.6	0.8		242~300	19.2~20
	4	环形	250~300	3.0	1.0		367~433	20.8~26.7

表 4-4-9 氧-乙炔等压式割炬（机器切割）切割低碳钢时和切割工艺参数

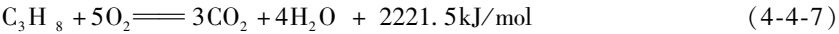
板厚/mm	切割氧孔径/mm	氧气压力/MPa	切割速度/(cm/min)	氧气消耗量/(L/min)	
				氧气	乙炔
5	0.5 ~ 1.0	0.1 ~ 0.21	50 ~ 81	8.3 ~ 26.7	2.3 ~ 4.3
6	0.8 ~ 1.5	0.11 ~ 0.24	51 ~ 70	16.7 ~ 43.3	2.8 ~ 5.2
9	0.8 ~ 1.5	0.12 ~ 0.28	48 ~ 66	21.7 ~ 55	2.8 ~ 5.2
12	0.8 ~ 1.5	0.14 ~ 0.30	43 ~ 61	36 ~ 58.3	3.8 ~ 6.2
19	1.0 ~ 1.5	0.15 ~ 0.35	38 ~ 56	55 ~ 75	5.7 ~ 7.2
25	1.2 ~ 1.5	0.15 ~ 0.38	25 ~ 48	61.7 ~ 81.7	6.2 ~ 7.5
38	1.7 ~ 2.1	0.16 ~ 0.38	30 ~ 38	86.7 ~ 113	6.5 ~ 8.5
50	1.7 ~ 2.1	0.16 ~ 0.42	25 ~ 35	86.7 ~ 123	7.5 ~ 9.5
75	2.1 ~ 2.2	0.20 ~ 0.35	20 ~ 28	98.3 ~ 157	7.5 ~ 10.8
100	2.1 ~ 2.2	0.28 ~ 0.42	16 ~ 23	138 ~ 182	9.8 ~ 10.3
125	2.1 ~ 2.2	0.35 ~ 0.45	14 ~ 19	163 ~ 193	9.8 ~ 13.7
150	2.5	0.37 ~ 0.45	14 ~ 17	188 ~ 232	12.3 ~ 15.2
200	2.5	0.42 ~ 0.63	9 ~ 12	240 ~ 293	14.7 ~ 18.3
250	2.5 ~ 2.8	0.49 ~ 0.63	7 ~ 10	288 ~ 353	17.5 ~ 21.2
300	2.8 ~ 3.0	0.49 ~ 0.74	6 ~ 9	340 ~ 415	19.8 ~ 24.5
350	2.8 ~ 3.0	0.74	5 ~ 8	392 ~ 493	22.7 ~ 27.8
400	3.2 ~ 4.0	0.77	4.5 ~ 7.5	442 ~ 643	27 ~ 33.8
450	3.7 ~ 4.0	0.84	4.3 ~ 7.5	493 ~ 795	30.7 ~ 39.2
500	4.0 ~ 5.0	0.95	3.8 ~ 7.5	547 ~ 970	30.8 ~ 46.7

(3) 安全注意事项

- 1) 氧气瓶、乙炔瓶应分开放置在专用库房内，严禁在同一房间存放。存放库房必须保证空气畅通，气瓶不得接触油污。严禁和易燃物、易爆物混放在一起。
- 2) 氧气瓶用黑色标注“氧气”字样，乙炔瓶用红色标注“乙炔”字样，严禁涂改。库房内满瓶和空瓶应分开堆放。
- 3) 氧气瓶和乙炔瓶不得同车运输，运输前应旋紧瓶帽。应轻装轻卸，严禁抛、滑或碰击。
- 4) 气瓶在存放或使用过程中，严禁靠近热源，乙炔瓶必须直立放置，不准横躺卧放，以防丙酮流出引起燃烧爆炸。
- 5) 气瓶在使用过程中，两气瓶间距为 5m 以上，与明火间距为 10m 以上，使用中必须配备氧气瓶帽、防振圈、压力表、回火阀，使用现场要配备灭火器。
- 6) 气瓶严禁抛掷或剧烈滚动，不得安放在可能产生火星的电气设备或热力管道附近。室外使用必须做好防晒防淋，严禁在太阳下暴晒。冬天使用气瓶冻结时，严禁用明火烘烤或用金属敲击瓶阀。
- 7) 氧气、乙炔瓶着火时，应立即关闭瓶阀，使火自行熄灭，可用二氧化碳、干粉灭火器，不得使用水、泡沫或四氯化碳灭火器。氧气软管着火时，不得折弯软管断气，应迅速关闭氧气阀门，停止供气；乙炔软管着火时，应先关气阀，可采取折弯前面一段软管的办法来灭火；使用中应随时观察气瓶、胶管有无漏气现象，并保持喷口畅通。
- 8) 乙炔气瓶的使用压力不得超过 0.147MPa，输气流速每瓶不得超过 1.5m³/h。气瓶内的气体不得全部用尽，氧气瓶应留有 0.2MPa 的剩余压力；乙炔瓶必须留有不低于规定的剩余压力。

2. 氧丙烷切割

(1) 丙烷的性质 丙烷分子中的碳与碳之间是饱和烃，其碳原子都是以单键相结合，化学性质比乙炔稳定，对温度、压力、冲击等外界条件敏感性低。丙烷的物理性质：常温常压下是无色无味的气体，着火点温度 580℃；相对分子量是 44.06，标准状况下，密度是 1.85g/L，微溶于水，溶于乙醇、乙醚。丙烷与氧燃烧的化学反应式为



丙烷在纯氧中燃烧的火焰温度可达 2850℃ 以上，火焰比较柔和，体积发热量比乙炔大。丙烷的燃烧热值（标准状态）：高热值 101266kJ/m³，低热值 93240kJ/m³。丙烷燃烧速度在纯氧中为 2m/s、在空气中为 1.5m/s。

（2）切割工艺参数 氧-丙烷切割与氧乙炔切割相似。氧丙烷切割的割炬也分为射吸式割炬和等压式割炬，射吸式割炬大多用于手工切割，其主要切割工艺参数见表 4-4-10；等压式割炬大多用于机器切割，其主要切割工艺参数见表 4-4-11。

表 4-4-10 氧-丙烷射吸式割炬手工切割的切割工艺参数

割嘴号	切割厚度/mm	氧气压力/MPa	燃气压力/MPa	备注
1	5 ~ 10	0.2		
2	10 ~ 20	0.25	0.3	配 G01—30 割炬
3	20 ~ 30	0.3		
1	5 ~ 10	0.2	0.03	
2	10 ~ 20	0.25	0.03	
3	20 ~ 40	0.3	0.03	配 G01—100 割炬
4	40 ~ 60	0.4	0.04	
5	60 ~ 100	0.5	0.04	
6	100 ~ 150	0.6	0.04	
7	150 ~ 180	0.7	0.04	
8	180 ~ 220	0.8	0.05	配 G01—300 割炬
9	220 ~ 260	0.9	0.05	
10	260 ~ 300	1.0	0.05	

注：带 * 为 20 型割嘴，只配 G01-30 型割炬。

表 4-4-11 氧-丙烷等压式割炬机器切割的切割工艺参数

割嘴号	切割厚度/mm	氧气压力/MPa	燃气压力/MPa	切割速度 / (mm/min)	备注
1	5 ~ 10	0.3	0.03	500 ~ 450	
2	10 ~ 20	0.3	0.03	450 ~ 350	
3	20 ~ 40	0.35	0.03	350 ~ 300	
4	40 ~ 60	0.45	0.04	300 ~ 250	
5	60 ~ 100	0.6	0.04	250 ~ 230	
6	100 ~ 150	0.7	0.04	230 ~ 200	
7	150 ~ 180	0.8	0.05	200 ~ 170	
8	180 ~ 220	0.9	0.05	170 ~ 140	
9	220 ~ 260	0.95	0.05	140 ~ 90	
10	260 ~ 300	1.0	0.05	90 ~ 70	配机用等压式割炬

（3）安全注意事项 工业发达国家普遍使用高热量价廉的丙烷（C₃H₈）气体进行火焰切割。但氧丙烷切割要求氧气纯度高于 99.5%（体积分数），丙烷气的纯度也要高于 99.5%（体积分数）。一般采用 G01—30 型割炬配用 GKJ4 型快速割嘴。与氧乙炔切割相比，氧丙烷切割的特点如下：

- 1) 切割面上缘不烧塌，熔化量少；切割面下缘黏性熔渣少，易于清除。
- 2) 切割面的氧化皮易剥落，切割面的粗糙度相对较低。
- 3) 切割厚钢板时，不塌边、后劲足，切口表面光洁、棱角整齐，精度高。
- 4) 倾斜切割时，倾斜角度越大，切割难度越大。
- 5) 与氧乙炔切割相比，总成本约降低 30% 以上。

开始切割时，预热火焰用氧化焰（氧与丙烷混合比 5:1），以缩短预热时间；进入正常切割时使用中性焰（混合比为 3.5:1）。使用丙烷气切割与氧乙炔切割的操作步骤基本相同，只是氧丙烷火焰略弱，切割速度较慢一些。采取如下措施可提高切割速度：

- 1) 预热时，割炬不抖动，火焰固定于钢板边缘一点，适当加大氧气量，调节火焰成氧化焰。
- 2) 换用丙烷快速割嘴使切口变窄，适当提高切割速度。
- 3) 直线切割时，适当使割嘴后倾，可提高切割速度和切割质量。

4.2.3 气割的应用

并不是所有金属都能采用气割，只有符合下列条件的金属才能进行气割：

- 1) 金属能与氧发生剧烈的氧化反应，并放出足够的热量。
- 2) 金属导热性不应太高。
- 3) 金属燃烧点要低于它的熔点。
- 4) 金属氧化物的熔点要低于金属本身的熔点。
- 5) 生成的氧化物应该易于流动。

符合上述条件的金属有纯铁、低碳钢、中碳钢和低合金钢以及钛等。其他常用的金属材料如铸铁、不锈钢及耐酸钢、铝和铜等则必须采用特殊的方法进行切割。因此，气割一般只用于低碳钢、低合金钢和钛及钛合金切割。

4.2.4 气焊与气割的设备及辅助器具

(1) 氧气瓶 氧气瓶是储存高压氧气的容器，容积为 40L，储氧的最大压力为 15MPa，形状如图 4-4-8 所示。按规定氧气瓶外表漆成天蓝色，并用黑漆标明“氧气”字样。氧气在高温下遇到油脂，就会有自燃爆炸的危险。必须正确地使用和保管氧气瓶：氧气瓶不应与其他气瓶混在一起；气焊工作地点与其他火源要距氧气瓶 5m 以上；禁止撞击氧气瓶；严禁沾染油脂等。氧气瓶口装有瓶阀，用以控制瓶内氧气进出，手轮逆时针方向旋转则可打开瓶阀，顺时针旋转则关闭。

(2) 减压器 减压器的作用是将高压氧气瓶中高压氧气减压至焊炬所需的工作压力（0.1 ~ 0.3MPa）供焊接使用；同时减压器还有稳压作用，以保证火焰能稳定燃烧。减压器的构造和工作原理如图 4-4-9 所示。使用减压器时，先缓慢打开氧气瓶阀门，然后旋转减压器的调节手柄，待压力表指示值达到所需要压力时为止；在停止工作时，先松开减压阀的调节螺栓，再关闭氧气瓶阀门。

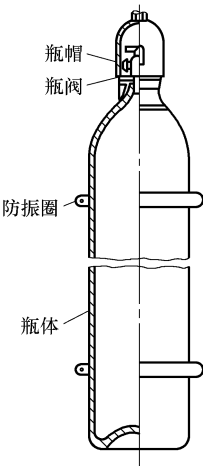


图 4-4-8 氧气瓶形状

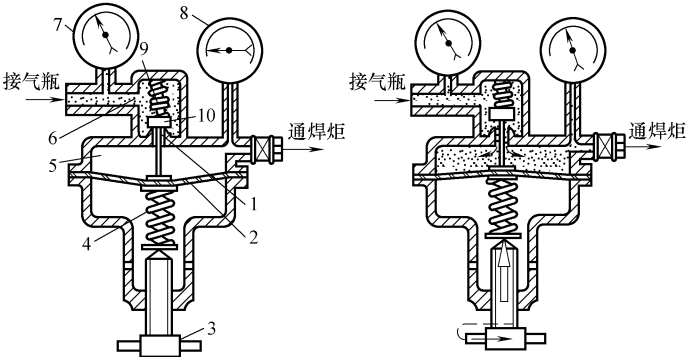


图 4-4-9 减压器的构造和工作原理

1—通道 2—薄膜 3—调压手柄 4—调压弹簧 5—低压室 6—高压室
7—高压表 8—低压表 9—活门弹簧 10—活门

减压器的的工作原理：如图 4-4-9 所示，松开调压手柄 3（逆时针方向），活门弹簧 9 闭合活门室 10，高压气体就不能进入低压室 5，从氧气瓶来的高压气体停滞在高压室 6 内，高压表 7 指示出高压室气体的压力，即氧气瓶内气体的压力。拧紧调压手柄（顺时针方向），使调压弹簧 4 顶压低压室内的弹性薄膜 2，并通过传动杆顶开高压室与低压室间通道 1 的活门，使高压室内的高压气体进入低压室，于是高压气体体积膨胀，压力下降，此时低压表 8 指示出低压室气体的压力，低压室气体从出气口橡胶管流向焊炬。如果低压室气体压力偏高了，向下的总压力大于调压弹簧向上的力，则压迫弹性薄膜和调压弹簧，而使活门开启的程度变小，进入低压室的高压气体量减小，低压室气体压力下降；相反，低压室的气体压力偏低了，向下的总压力小于调压弹簧向上的力，此时弹性薄膜上鼓，使得活门开启程度变大，进入低压室的高压气体量增加，于是低压室的气体压力升高；活门的开启程度取决于调压螺栓的行程，当进入低压室的高压气体流量与低压室输出气体的流量相等时，即输出气体稳定在设定的压力值，减压器能自动维持低压气体的压力。通过调压螺栓的行程来调节调压弹簧压力，就能调整气焊和气割所需的气体压力。

(3) 乙炔瓶 乙炔瓶是储存溶解乙炔的容器，其外形与氧气瓶相似，如图 4-4-10 所示，但其表面涂成白色，并用红漆写上“乙炔”字样。在瓶的顶部装有阀门，供开闭气瓶和安装减压器、橡胶气管，并用瓶帽保护；在瓶内装有浸满丙酮的多孔性填充物（活性炭、木屑、硅藻土等），丙酮对乙炔有良好的溶解能力，可使乙炔稳定、安全地储存于钢瓶内。使用时打开阀门，溶解在丙酮中的乙炔就分离出来。通过乙炔瓶阀流出，而丙酮仍留在瓶内，以便溶解再次压入的乙炔；在瓶阀下面的填充物中心部位的长孔内放置石棉绳，其作用是促使乙炔与填充物分离。

(4) 焊炬 焊炬是气焊的主要工具。燃气和氧气通过焊炬以一定的比例进行混合后由喷嘴孔喷出。按燃气和氧气的混合方式的不同，焊炬分为射吸式和等压式两类。

1) 射吸式焊炬：氧气通过喷嘴以很高的速度射入射吸管，将低压燃气吸入射吸管。氧气与燃气以一定的比例在混合管内混合后流出，点燃后形成供焊接使用的火焰。燃气压力不大时，也能保证正常使用（一般燃气压力大于 0.001MPa 即可）。其构造原理如图 4-4-11 所示。

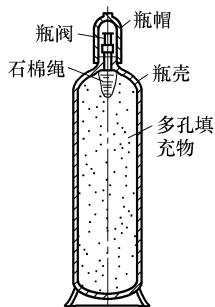


图 4-4-10 乙炔气瓶的外形

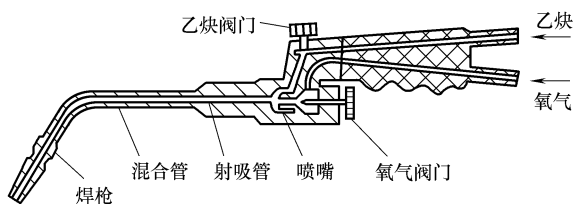


图 4-4-11 射吸式焊炬的构造原理图

2) 等压式焊炬：氧气和燃气各以一定的压力和流量进入混合室混合后由焊嘴喷出，点燃后形成气焊火焰。等压式焊炬与射吸式焊炬相比结构简单，只要进入焊炬的气体压力不变，就可以保证火焰的稳定。等压式焊炬由于燃气压力较高，所以回火的可能性比射吸式焊炬小。

焊炬所使用的可燃气体主要以乙炔燃气为主。由于以丙烷、丙烯等石油气体为主的新型燃气的出现，目前开发出了丙烷焊炬和焊嘴。丙烷焊炬和乙炔焊炬在外形上是一样的，内部结构略有不同。丙烷焊嘴和乙炔焊嘴结构差别较大。由于丙烷等石油气体与乙炔气相比火焰温度低、燃烧速度慢、耗氧量大，效果不如乙炔，故仅用于铜、铝等有色金属气焊、钎焊和薄板（厚 2mm 以下）碳钢的气焊。

(5) 割炬 割炬是进行火焰切割的主要工具。割炬分为手工割炬和机用割炬，机用割炬主要

用于各种切割机。无论是手工割炬还是机用割炬，按工作原理可分为射吸式割炬和等压式割炬。

1) 手工割炬。可分为如下三种：

① 射吸式割炬。其结构如图 4-4-12 所示。当氧气以很高的速度射入射吸管时，将低压燃气吸入射吸管。氧气与燃气以一定的比例混合后从割嘴混合气体孔中流出，点燃后形成所需的预热火焰。通过燃气阀门和预热氧阀门可将预热火焰调节至合适的长度，用以加热被切割处的金属。当被切割处金属预热到燃烧温度后，打开切割氧阀门，提供高速切割氧流，移动割炬形成切口，实现切割。

射吸式割炬对燃气压力要求不高，可采用低压燃气，也可采用中压燃气。射吸式割炬是应用最广的通用型手工割炬。

② 等压式割炬。等压式割炬的燃气、预热氧分别由单独的管路进入割嘴内混合。由于燃气是靠自身的压力进入割炬，所以它不适用于低压燃气，而须采用中压燃气。等压式割炬具有气体调节方便、火焰燃烧稳定、不易回火等优点，其应用越来越普遍。其结构如图 4-4-13 所示。

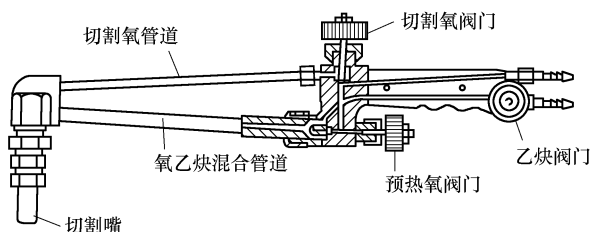


图 4-4-12 射吸式割炬结构

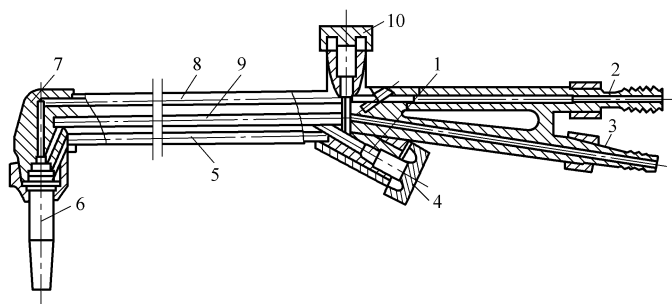


图 4-4-13 等压式割炬结构

1—主体 2—氧气接头 3—燃气接头 4—预热氧阀门 5—预热氧气管
6—割嘴 7—割嘴接头 8—切割氧气管 9—燃气管 10—切割氧调节阀

③ 焊割两用炬。焊割两用炬既可以用作焊炬，又可以用作割炬，在通常情况下是装配成割炬形式的，当需要用作焊炬时，需拆下连接在主体上的切割氧气管、混合气管及割嘴，换上适合于焊接用的混合气管和焊嘴，切断切割氧气源，关紧切割氧调节阀，就变成焊炬，可进行气焊工作。

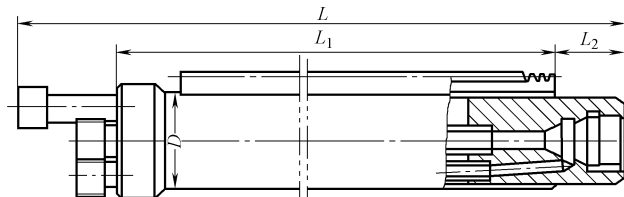


图 4-4-14 机用射吸式割炬结构

2) 机用割炬。机用割炬主要是用于各种数控、门架式、光电、仿形、小车式的自动或半自动切割机。按使用的割嘴不同，也分为射吸式和等压式两种结构，分别如图 4-4-14 和图 4-4-15 所示。

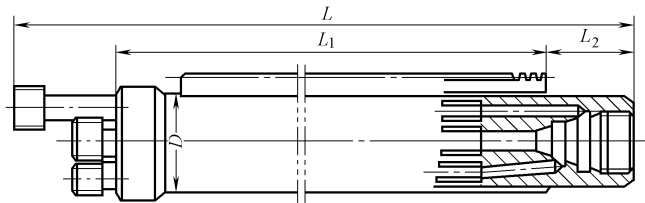


图 4-4-15 机用等压式割炬结构

(6) 辅助器具与防护用具 辅助器具有通针、橡皮管、点火器、钢丝刷、锤子、锉刀等。防护用具具有气焊眼镜、工作服、手套、工作鞋、护脚布等。

4.3 高压水射流切割的工艺及设备

水射流切割（water-jet cutting）属于高能束加工范畴，是一种可与激光、等离子体、电子束加工方法媲美的新型切割加工方法。水射流源于采矿业，20 世纪 50 年代起，科学工作者研究利用高聚能水射流对材料的破坏作用来切割材料，由于当时技术水平的限制，水压只在 100MPa 以下，无法将水的能量提高得很高。到 70 年代，研制出了高压泵和增压器，其水压可达到 200MPa 以上，目前水压可达到 1000MPa 以上。1972 年，首台高压水射流切割机在美国问世，可切割多种非金属材料。1983 年，美国制造出磨料水射流切割机，其切割能力大幅度提高，可用于切割各种金属及非金属材料。

4.3.1 高压水射流切割的工作原理

高速水射流是利用高压泵将水介质增压至 300 ~ 420MPa，然后通过一个直径 0.08 ~ 0.5mm 的小孔以 500 ~ 900m/s 的速度喷出，从而形成高速、高能、高穿透力水束，功率密度高达 10^6 W/mm^2 ，用这种高速高密度的水射流进行切割。磨料水射流切割则是再往水射流中混入磨料粒子，经混合管形成磨料射流进行切割。在磨料射流中，水射流作为载体使磨料粒子获得很大的动能。由于磨料质量大、硬度高，磨料水射流比水射流的射流动能更大，切割效能更强。

4.3.2 高压水射流切割的分类

高压水射流切割法按所用的工作介质分为高压水射流（纯水型）切割和在水中加入各种磨料的磨料高压水射流切割两种类型，如图 4-4-16 所示。目前正在研究一种空泡（流体中因局部压力降低，液体内部形成气相的现象）型水射流，主要是利用空泡对工件的侵蚀作用来提高纯水型高压水射流切割的切割能力，但尚未达到实用阶段。

1. 纯水型

纯水型高压水射流切割法，水压为 20 ~ 400MPa，由于仅仅利用从喷嘴孔喷出的高速高压水射流进行切割，与加磨料水射流切割相比，切割能力相对较低，但设备简单，消耗物品少，操作成本低。

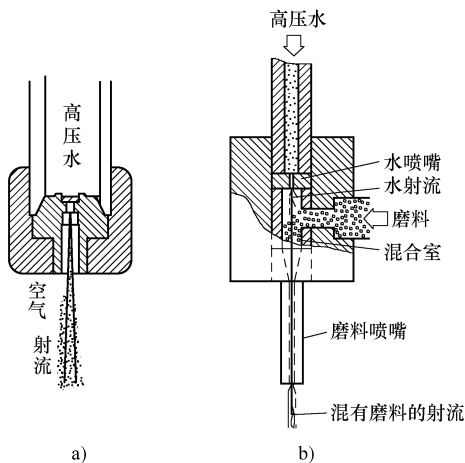


图 4-4-16 高压水射流切割的两种类型

a) 纯水型 b) 加磨料型

2. 加磨料型

加磨料型高压水射流切割法，因在水中掺入磨料，大大增强了水射流的冲击作用，故其切割能力比纯水型切割法大为提高，但设备较复杂，操作成本高。

加磨料型水射流切割，按掺入磨料的方式和水压高低可分为高压磨料水射流切割和低压磨料水射流切割两种。后者是近年才开发的一种新技术，具有很多优点，所以是一种很有发展前途的切割方法。

(1) 高压加磨料型 高压加磨料型水射流切割是将高压水和磨料分别用管道输送至割炬，在割炬的混合室内混合后，磨料随高压水从喷嘴中喷出，故也称挟带式水射流切割。切割所用的水压通常在 $100 \sim 400\text{MPa}$ ，近年来也有使用水压低于 100MPa 的。由于水压力很高，水从高压泵至割炬采用刚性的管子输送（柔性管仅在短时间内能承受 250MPa 的压力），切割工作只能在高压泵附近进行，所以大多数高压加磨料型水射流切割是固定式的。

(2) 低压加磨料型 低压加磨料型水射流切割是将水和磨料预先在加压储罐内进行混合，然后把混合好的、带磨料的液浆用管子输送至割炬，从喷嘴中喷出进行切割，所以也称为直接注入式水射流切割。所使用的水压较低，通常在 $20 \sim 100\text{MPa}$ 。由于水压相对较低，液浆可利用柔性管子输送到割炬，故割炬能远离高压泵装置，可在 $300 \sim 500\text{m}$ 范围内实施切割，甚至能在距离高压泵 500m 处的进行切割和水下切割。与高压加磨料型水射流切割相比，低压加磨料型水射流切割具有以下优点：

- 1) 由于使用的水压力较低，水泵的成本低。
- 2) 结构简单，可以采用柴油机驱动整个机组。而柴油机不需要外部电源，因此机组可随意移动。
- 3) 因水压力低，可使用柔性管，割炬可远离水泵装置。
- 4) 能以和高压型相同的速度进行切割加工。
- 5) 由于磨料悬浮在水中并用软管输送至喷嘴，消除了高压型因干料受潮致使磨料在管路中阻塞的问题。
- 6) 因浆液中水量大于磨料量，喷嘴的消耗大为减少。
- 7) 对水源的质量无特别要求，咸水或淡水都可使用。
- 8) 对设备的要求不像高压型要求的那样严格，且对工件的不平整也不太敏感。
- 9) 喷嘴结构简单，而高压型的喷嘴需精确对中，以免喷嘴过快磨损。此外，必要时可更换喷嘴，整个设备也可用于喷砂作业。

4.3.3 高压水射流切割的工艺特点

1. 纯水型高压水射流切割

在空气中喷出的高速水射流的结构如图 4-4-17 所示。喷嘴出口区附近具有不含空气的中心水流，随着离喷嘴端部距离的增大，水射流逐渐扩展，并在外围区与空气相混合。

水射流中的压力在喷嘴出口附近分布较陡，且峰值较大。随着与喷嘴端部距离的增加，压力分布逐渐平缓。当水压大于 196MPa 时，喷出的水射流的速度超过声速。纯水射流对材料有以下作用：

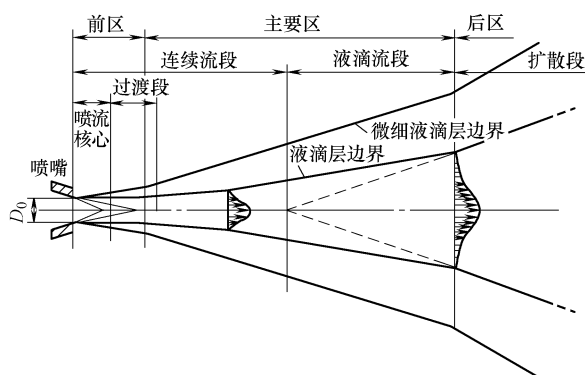


图 4-4-17 在空气中喷出的高速水射流的结构示意图

- 1) 动压作用。
- 2) 因空泡引起的侵蚀作用（空蚀作用）。
- 3) 因水滴的非固定撞击所引起的水冲击作用。

纯水射流切割就是借助高速水射流的上述作用来破坏材料分子间的结合，并将切口中破损的材料除去的过程。

2. 加磨料型高压水射流切割

加磨料型高压水射流切割是借助水射流的动能加速磨料，利用磨料及水的动能来冲击和切割材料的过程。加磨料型高压水射流切割过程是由三种作用共同完成的：第一种是固体颗粒及液滴的冲蚀作用；第二种是带磨料的水射流沿工作界面的剪切破断作用（切削作用）；第三种是切割面上磨料还起到微机械加工的作用。

高压水射流切割的最大特点是用非热源的高能量水射流束来进行加工，切割中无热过程，故可用来切割几乎所有的金属及非金属材料，特别适用于各种热切割方法难以加工或不能加工的材料。此外，高压水射流切割还具有以下一些特点：

- 1) 由于水的冷却作用，被切割工件的温升很小，切口（包括切割面）的温度低于 100℃，不产生热变形及热影响区，因此不会改变被切割材料的材质及性能，对于合金钢、有色金属（如钛、锆等）等热敏感性强的材料的切割尤为合适，还可直接制备金相检验用的试件。
- 2) 切口质量高，没有毛刺、挂渣，切割面垂直、平整、光洁程度高，而且也没有撕裂或应变硬化等现象。切割薄金属板时，切割边不发生卷口现象。
- 3) 切口宽度较小。纯水型切割时，水射流的直径通常在 0.1 ~ 0.5mm，加磨料型的喷嘴孔径为 1.2 ~ 2.5mm，在切割套料时有利于提高材料的利用率。
- 4) 可以从工件上的任意一点开始或中止切割，而且加工零件内部的开孔也比较容易。
- 5) 由于切割中反作用力小，割炬可用机器人来操纵，能用来切割三维曲面的工件。
- 6) 不产生对人体健康有害的气体、粉尘等，对石棉、毛织物及各种纤维合成材料的加工尤为合适。
- 7) 在严禁明火作业的区域，如海洋石油钻井及采油平台、炼油厂、大型油气储罐区以及油气输送管道等场合均可实现安全切割。

相对而言，高压水射流切割存在以下一些缺点：

- 1) 设备成本比其他切割方法高。
- 2) 切割硬质材料时的切割速度较低。
- 3) 切割精度与机械加工相比稍差。
- 4) 在某些切割场合，需对废水进行处理。
- 5) 加磨料型的操作成本较高。

4.3.4 高压水射流切割的工艺参数

高压水射流切割的工艺参数很多，如切割水压、喷嘴孔径、喷嘴高度、磨料粒度、磨料量等。这些参数对材料切割的影响机制和影响程度各不相同。加磨料型高压水射流切割，影响切割速度的主要工艺参数如图 4-4-18 所示，其中影响最大的因素有喷嘴孔径、由切割水压力所

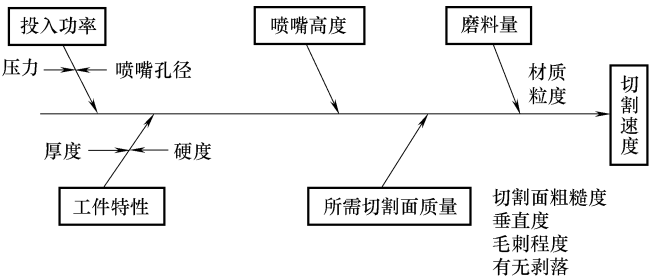


图 4-4-18 影响加磨料型高压水射流切割速度的主要工艺参数

决定的功率及磨料供给量。因此，切割水压、喷嘴孔径、磨料以及工件的材质和厚度不同，则所能达到的最大切割厚度也不同，获得的切口质量也不相同。另外，适当增加磨料的供给量，虽然切割速度有所提高，但磨料的价格较高，使得加工成本提高，故在选用切割参数时，还应当考虑到切割的经济性因素。

1. 纯水型切割工艺参数示例

采用纯水型高压水射流来切割某些非金属材料的代表性工艺参数见表 4-4-12。

表 4-4-12 纯水型高压水射流切割某些非金属材料的代表性工艺参数

材料	材料厚度/mm	水压力/MPa	喷嘴孔径/mm	切割速度/(mm/min)	附 注
瓦楞纸(1 层)	8	240	0.18	190	也可用激光来切割,但对于较大厚度的材料,切割面易发生炭化
瓦楞纸(2 层)	15	240	0.25	150	
叠层纸	6.3	309	0.25	16	
	12	309	0.25	3.5	
压制纸板	1.6	274	0.18	45	
玻璃纸	0.3	343	0.10	120	
纸质尿布	5.0	343	0.12	300	
石膏板	15	294	0.15	20	也可用激光来切割
	20	294	0.20	25	
石棉	10	294	0.20	8	
玻璃棉	30	343	0.17	150	
	80	343	0.15	40	
橡胶	3	377	0.12	60	也可用激光来切割,但厚度限于 10mm 以下,且切割面易发生炭化
	15	377	0.17	12	
硅橡胶	12	377	0.12	3	
帘布橡胶	0.3	377	0.12	150	
硬质橡胶	19	309	0.25	6	
	30	377	0.20	1.5	也可用激光来切割,但易发生炭化
布料(50 层)	20	309	0.18	3	
布料	30	343	0.25	2.5	
纤维织物	20	377	0.20	6.0	
毛毡	30	294	0.15	150	
	50	240	0.13	95	

2. 加磨料型切割工艺参数示例

采用加磨料型高压水射流切割某些金属与非金属材料的工艺参数见表 4-4-13、表 4-4-14。

表 4-4-13 加磨料型高压水射流切割金属材料的工艺参数

材 料	材料厚度/mm	水压力/MPa	喷嘴孔径/mm	切割速度/(mm/min)
C-Mn 钢	12	75	3	50
	25	75		25
	30	75		20
	50	69		15
不锈钢	3	75	3	200
	8	70		60
	10	69		35
	50	70		15
	25	245	0.33/1.2 ^①	30
	50			10
	50	196	0.4/1.5 ^①	15
	13	309	0.25/0.76 ^①	150
	25			170

(续)

材 料	材料厚度/mm	水压力/MPa	喷嘴孔径/mm	切割速度/(mm/min)
铝	3	90	3	500
	3	69		350
	85	196	0.4/1.3 ^①	20
	3	206	0.3/1.2 ^①	750
	80		0.46/1.6 ^①	20
	150		0.46/1.6 ^①	10
	1.6	309	0.25/0.76 ^①	1270
	12			500
	100			500
铝合金	6	69	3	250
	10	69		125
	12	74		130
	25	90		70
钢 钨铬钴合金(2mm)	17	69	3	50
钢 钨铬钴合金(6mm)	31	69	3	60
钢 钨铬钴合金(8mm)	18	69	3	15
低碳钢	3	75	3	210
	10	69		32
铁	25	245	0.46/1.6 ^①	20
	50			10
	12	309	0.25/0.76 ^①	100
	50			70
	175			10
Mn30%—Al18% 钢	10	75	3	40
铜	3	75	3	150
钛	12	69	3	36
	25			25
	4	206	0.33/1.2 ^①	600
	10		0.46/1.6 ^①	140
	25		0.46/1.6 ^①	40
球磨铸铁	15	309	0.25/0.76 ^①	150
因科镍合金	2	245	0.46/1.6 ^①	900
	15			80

① 喷嘴孔径的值为纯水型喷嘴直径/加磨料型喷嘴直径。

表 4-4-14 加磨料型高压水射流切割非金属材料的工艺参数

材料	材料厚度/mm	水压力/MPa	喷嘴孔径/mm	切割速度/(mm/min)
石棉	20	74	3	380
	20	245	0.33/1.2 ^①	800
	30			300
	40			200
玻璃	2	245	0.46/1.6 ^①	3800
	6	206	0.33/1.2 ^①	3500
	20	206	0.46/1.6 ^①	600
	12	309	0.25/0.76 ^①	1270
	19			640
	25			130
玻璃纤维	8	206	0.46/1.6 ^①	2500
	16	206	0.33/1.2 ^①	600
	8	309	0.25/0.76 ^①	2000
	12			800

(续)

材料	材料厚度/mm	水压力/MPa	喷嘴孔径/mm	切割速度/(mm/min)
钢筋混凝土	70	69	3	20
	120	72		25
开普勒塑料	4	72	3	130
碳纤维合成材料	2	69	3	1000
	8	69		350
ABS 塑料	10	245	0.33/1.2 ^①	900
	18			600
G-10 塑料	13	245	0.33/1.2 ^①	450
	25			100
聚四氟乙烯	45	245	0.33/1.2 ^①	150
聚丙烯	10	245	0.33/1.2 ^①	910
	120			30
炭精石墨	70	206	0.33/1.2 ^①	600
	10	245		900
	14	245		800
	25	245		300
片料吹膜化合物	2	206	0.33/1.2 ^①	4000
	5	245		2200
丙烯	7	206	0.33/1.2 ^①	1800
	20	206	0.33/1.2 ^①	600
陶瓷	4	70	3	200
	8	70		300
	3.6	196	0.4/1.1 ^①	500
	13		0.4/1.3 ^①	200
丙烯	7	206	0.33/1.2 ^①	1800
	20			600
大理石	25	70	3	50
花岗岩	20	196	0.4/1.5 ^①	50
玻璃纤维增强塑料	19	196	0.4/1.1 ^①	200
氧化铝纤维增强塑料	6	196	0.4/1.6 ^①	600
酚醛树脂	20	206	0.33/1.2 ^①	450
开普勒纤维	8	309	0.25/0.76 ^①	500
	12			380

① 喷嘴孔径的值为纯水型喷嘴直径/加磨料型喷嘴直径。

4.3.5 高压水射流切割的应用范围

高压水射流切割的应用范围取决于高压水射流的类型。

1. 纯水型高压水射流切割

纯水型切割仅仅利用高速水射流的动能，故其切割加工能力较差，只能适用于切割质地较软的材料，如橡胶、布匹、纸张及玻璃纤维增强合成材料等，也可以用于木板、皮革、泡沫塑料、玻璃、毛织品、地毯、碳纤维织物以及其他层压材料的切割加工。

2. 加磨料型高压水射流切割

加磨料型高压水射流切割因在水中加入了特殊的磨料，水射流的冲击作用远大于纯水型切割，故其加工能力大大提高，尤其适用于切割硬质材料。

加磨料型水射流不但能切割各种金属材料，对热敏感性强的金属（如钛合金）、硬质合金以及表面堆焊有硬化层的零件、外包或内衬异种金属或非金属材料的钢制容器或管道等工件的切割特别有效。加磨料型高压水射流还可以用于切割陶瓷、钢筋混凝土、花岗岩以及各种复合材料等。与纯

水型切割相比,加磨料型切割作用于切割区的平均应力低,工件中残留的残余变形很小。可用纯水型切割的材料,不宜选用加磨料型水射流进行切割,因为后者操作成本高,不经济。

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [2] 王洪光, 赵冰岩, 洪伟. 气焊与气割 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [3] 郭继承, 王彦灵. 焊接安全技术 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2010.
- [4] 格里兹马宁柯. 金属气焊与气割 [M]. 李佩昆, 译. 北京: 中国工业出版社, 1963.
- [5] 胡安. 气焊气割作业安全技术 [J]. 安全与健康, 2010 (4): 38-39.
- [6] 罗诚. 最新船舶焊接和切割新技术、新工艺与应用技术标准实用手册 [M]. 香港: 中国科学文化出版社, 2010.
- [7] 中国机械工程学会焊接学会. 焊工手册 (手工焊接与切割) [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2003.

第5章 热 剂 焊

热剂焊 (Thermit Welding, TW) 是依赖于铝等金属的活性高温引燃, 把金属氧化物中的金属元素置换, 而得到液态金属, 填充到模具内, 熔化待焊母材而形成焊缝的焊接方法。主要用于铁路钢轨焊接, 被称为铝热焊。在电力领域, 热剂焊代替机械连接方法, 提高了焊接点的载流能力, 由于焊接达到了原子间的结合, 是一种永久的连接方法, 提高了接头的使用寿命, 因此被美国电气和电子工程师协会 (IEEE) 推举为接地线路的最好连接方法。近年来, 热剂焊在我国也得到了大量应用。本章主要介绍热剂焊原理与特点及其所使用的材料、工艺和应用。

5.1 热剂焊的原理及特点

热剂焊在焊接过程中使用了热剂反应产物作为填充材料, 避免了焊接过程造成的钢轨缩短。尽管热剂焊的接头强度、韧性、塑性等远不如电阻焊, 热剂焊方法在高速铁路建设中仍然与移动闪光焊占有几乎相同的份额, 成为车站道岔区焊接的唯一方法。

热剂焊是利用热剂的化学反应所产生的热作为焊接热源, 同时利用热剂反应的产物作为充填金属的焊接过程, 热剂焊具有一般熔焊的特点, 同时热剂焊接原理不同于其他焊接方法主要具有以下特点:

- 1) 热剂反应及反应产物。
- 2) 热剂反应过程中的冶金过程。
- 3) 焊接过程中的金属组织和相变。

4) 热剂焊对待焊工件采取整体加热的焊接方式, 材料焊接性也具有不同于局部加热方式的一些特点。

这些基本原理是直接和铝热焊接工艺密切相关的。热剂反应基本原理和反应产物可以作为热剂配比计算的基本依据。根据热剂反应过程中的冶金过程, 可以控制反应产物的冶金质量和保证基本成分的要求。控制焊接过程中的金属组织和相变, 可以使焊接接头的力学性能达到预期的要求。而浇注系统的设计, 则直接影响到焊缝的质量和缺陷的形成。

因为其他热剂的使用相对铝热剂要少很多, 本章主要讨论铝热反应、铝热焊的原理与特点。电力行业使用铝与氧化铜配成热剂, 仍然属于铝热剂的范畴。

5.1.1 热剂反应及反应产物

铝热化学反应是一个氧化还原反应, 利用还原金属 (铝) 和金属氧化物 (氧化铁)、铁合金和铁屑屑等按比例配成的铝热剂, 放在特制的坩埚中, 用高温火柴点燃, 高温火柴燃烧产生的热引起铝与氧化物间强烈的化学反应, 在反应过程中铁 (Fe) 被还原出来, 由于铁密度大, 沉于坩埚底部, 铝氧化成氧化铝 (Al_2O_3) 熔渣较轻浮于上部, 同时产生巨大的热量, 高温的熔液随即浇入扣在轨缝上的砂型中, 将两轨端部熔化, 浇注金属本身又作为填充金属, 将钢轨焊接起来。

各种金属对氧的化学亲和力大小各不相同, 与氧亲和力较大的金属能够把与氧亲和力较小的金属从它的氧化物中还原出来。铝在足够高的温度下, 与氧有很强的化学亲和力, 它可以从很多重金属的氧化物中夺取氧, 而把重金属还原出来, 例如能把铁、钛、硅、锰、铬、钒、钨等还原出来, 同时放出一定的热量。

它的化学反应的一般表示式为



式中 Me——金属（比 Al 与氧亲和力较小的金属）；

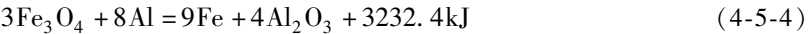
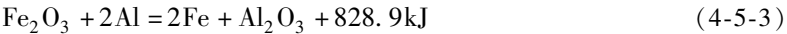
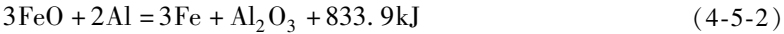
MeO——金属氧化物；

Al——铝，用作还原金属；

Al₂O₃——三氧化二铝（熔渣）；

Q——热量。

铝热焊的主要化学反应式为



为了获得优质的铝热钢，根据不同要求在热剂中可以加入含碳量较高的合金调整碳含量，同时加入一些合金元素，例如锰、硅以及钛、钼等，以得到较高的强度、硬度并改善其他力学性能。

1. 热剂反应过程的主要产物

在坩埚中的热剂一经点燃立即进行化学反应，生成一定量的铁，经加入合金元素，调整化学成分形成铝热钢，同时生成 Al₂O₃ 熔渣和其他成分的组成物如 MnO、FeO 等进入熔渣中，反应在若干秒内完成，但反应完成后必须有一定时间的停留（镇静时间），也就是在反应平静后适当时间才可浇注，以保证反应完全和保证铝热钢中含有一定量的铝。

铝热焊的主要反应产物为液态的铝热钢和熔渣。根据铝热焊主要化学反应式，从理论上计算纯铁和熔渣的产量，见表 4-5-1。

表 4-5-1 铝热反应纯铁与熔渣产量 (单位: g)

类 型	FeO ^①	Fe ₂ O ₃ ^②	Fe ₃ O ₄ ^③
1kg 热剂产生纯铁量	621. 7	522. 8	552. 1
1kg 热剂产生熔渣量	378. 3	477. 2	447. 9

- ① 氧化铁全部以 FeO 计算；
- ② 氧化铁全部以 Fe₂O₃ 计算；
- ③ 氧化铁全部以 Fe₃O₄ 计算。

由于反应不能进行完全，而且在熔渣中也夹杂一定量的铁，所以实际上，铁的生成量低于计算值。

熔渣的主要成分为 Al₂O₃，含有少量的氧化铁、氧化锰，以及硅酸物。氧化铁使熔渣呈黑色，氧化锰使熔渣呈褐色，正常的铝热钢的熔渣是棕褐色。

2. 铝热反应的温度

某金属与氧的亲合力大，说明该金属在燃烧时的生成热较大，各种金属氧化物的生成热见表 4-5-2。

表 4-5-2 各种金属氧化物的生成热

金属	氧化物	生成热/kJ/mol	金属	氧化物	生成热/kJ/mol
钙 Ca	CaO	152. 1	硅 Si	SiO ₂	205. 0
镁 Mg	MgO	145. 8	锰 Mn	MnO	96. 5
铝 Al	Al ₂ O ₃	393. 3	钒 V	V ₂ O ₅	437. 0
锆 Zr	Zr ₂ O	258. 2	铁 Fe	Fe ₂ O ₃	195. 2
铈 Ce	CeO ₂	233. 0	铁 Fe	FeO	64. 6
钛 Ti	TiO ₂	220. 0			

由表 4-5-2 可见，因为三氧化二铝的燃烧生成热较高，即铝与氧的亲合力较铁与氧的亲合力要大。因此铝与氧化铁的反应一旦开始，氧原子将与铝结合而置换出铁。

铝热反应放出大量的热,使熔渣和钢液的温度提高到很高的温度,根据文献记载,这一温度可达 2500 ~ 3500℃。从焊接实际需要出发,可以加入适量的添加剂,一方面使钢液温度降至 2000 ~ 2100℃,同时也使钢的生成率增加。

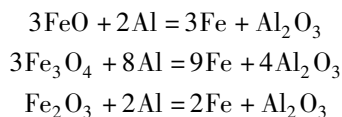
5.1.2 钢中的冶金过程

铝热反应过程是一个氧化和还原过程,其反应产物是钢和炉渣,在形成钢和渣的过程中以及形成以后,钢与渣之间以及钢、渣与坩埚耐火材料之间,各成分的相互反应不断进行。因此,所得钢的质量是与铝热反应的进行情况以及渣和坩埚耐火材料的组成和状态直接有关的。

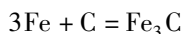
1. 坩埚中的渣—钢反应

铝热反应的产物钢和渣之间的反应与炼钢过程中的渣相与液相间的反应相似,同时具有这种反应的特点。为了得到合乎质量要求的铝热钢,对炉渣的成分和状态必须加以控制,对渣和钢之间的相互关系,应该有一个基本认识,以便于在生产过程中,掌握达到一定的质量要求。

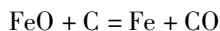
(1) 渣与钢中各组成物之间的关系 根据铝热反应的主要反应式:



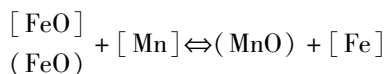
反应的主要产物纯铁 (Fe) 在调整成分形成钢的过程中将发生以下反应:



上述反应式中的 C 是为增加钢中的含碳量而在焊剂中添加的石墨粉,并不是全部的石墨粉都能在钢内形成碳化铁。其中的一部分石墨碳会与钢或渣中的氧 (在钢中以固溶氧 [O] 的形态或 [FeO] 形态存在,这里均以 FeO 表示) 发生反应:

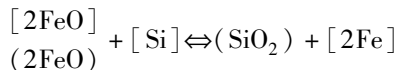


生成的 CO 气体,使坩埚内产生激烈的沸腾。为了提高铝热钢的含锰量,在焊剂中一般加入锰铁,锰铁中的锰以及钢液中的锰会与钢或渣中的氧形成反应:

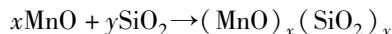


反应生成的 MnO 将进入渣中 (少部分可能以夹杂物形态存留于钢内),锰的氧化使钢进一步脱氧。

同样,为了提高钢中的含硅量 (例如在碱性或中性耐火材料的坩埚中),在焊剂中要加入硅铁增硅。加入硅铁中的硅以及钢液中的硅也会与钢或渣中的氧形成反应:



反应生成的 SiO₂ 进入渣中 (少部分可能残存于钢内形成夹杂物),其中 SiO₂ 也可与渣中的 MnO 结合形成 (MnO)_x(SiO₂)_y (硅酸锰) 进入熔渣中:

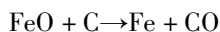


在铝热钢生成过程中要想通过熔渣来去除钢中的硫,必须满足两个条件:一是高温,二是熔渣具有高的碱度。铝热反应虽然能产生高温,但要配制高碱度渣系会引起钢液温度的降低,因此,在实际操作中不采取配制高碱度熔渣的方法,而采取严格控制原料中含硫量的方法,来保证铝热钢的含硫量在规定上限以下。

同样,要想在炼钢过程中达到去除钢中磷的目的,必须具备三个条件:高的熔渣氧化性、高的碱度和低的熔点。在铝热反应过程中要想满足这三个条件,必然会带来一系列不良的影响,如钢的脱氧不良、钢液温度低等,因此,在实际操作中也不采取这种方法,而是加强焊剂原料中含磷量的

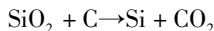
控制,以保证铝热钢的含磷量在规定限度以下。

(2) 渣—钢间氧的平衡、渣的氧化性 根据炼钢过程的一般原理,渣及钢中氧的含量是按照一定的比例分配的。当熔渣具有高的氧化性时(FeO 含量高时),钢内的含氧量也相应增高。在这种情况下,钢中一些易与氧化合的元素(例如铝、硅、锰等)被氧化,加入的一些合金元素也有较大的烧损,此时如不继续进行补充脱氧就进行浇注,就会造成脱氧不良或过氧化等情况,使钢的质量变坏。同样,如果渣内的氧化铁被充分还原,熔渣不具有氧化性,则所得到的钢的脱氧也必然会较完全,才可以得到质量良好的钢。从铝热反应的产物来看,正常状态下铝热钢的熔渣组成主要以 Al_2O_3 为主并会有少量的 FeO 、 MnO 以及硅酸物等,是一种中性渣。当铝热反应不完全时,焊剂中的氧化铁不能被足够量的铝还原时,就会有过量的氧化铁进入渣中,使渣具有较强的氧化性,此时,一部分氧化铁也会直接与钢内各成分反应,导致钢内的易与氧化合的元素氧化烧损。由于脱氧不良,在铝热焊浇注后,液态金属中的氧化铁还会与碳发生以下反应:



产生的 CO 气体在焊缝中会造成气孔等缺陷。

(3) 钢液与坩埚耐火材料的反应 铝热焊所用的坩埚耐火材料主要有3种:碱性耐火材料,常用的主要有镁砂(或电熔镁砂);酸性耐火材料,常用的有石英砂、天然硅砂等;中性耐火材料,常用的有高铝耐火材料等。坩埚在采用中性耐火材料情况下,钢液和耐火材料之间的反应较小。当采用碱性耐火材料时,熔渣中的硅酸物会与坩埚衬上的碱性化合物结合,使坩埚衬受到侵蚀,同时也使钢中硅的损耗增加。因此,在使用碱性耐火材料作坩埚衬的情况下,仅靠还原氧化铁中的硅和铁钉头中的硅所得钢中的含硅量是不够的,一般还要添加硅铁来增硅。在采用酸性耐火材料时(例如石英砂或天然硅砂等),由于铝热反应温度很高,在高温下,熔渣以及坩埚耐火材料中的 SiO_2 会被还原成 Si 进入钢内。例如:



在采用铁Ⅲ—50焊剂和石英砂坩埚的情况下,这种还原作用可使焊缝轨头 Si 的质量分数在1.0%~1.6%,对于低碳低合金钢的焊缝来说,此种含硅量已经足够,在焊剂内可以不用另加硅铁增硅。因此,在选择热剂时,应该考虑到坩埚耐火材料对钢液成分的影响。

(4) 熔渣的流动性 铝热钢的熔渣以 Al_2O_3 为主,含有少量的 FeO 、 MnO 以及硅酸物等,由于渣的熔点较高,因此渣的流动性较差。从钢的冶炼方面来看,良好的熔渣流动性是使钢和熔渣间反应充分进行的一个必要条件。另一方面,如果熔渣流动性不好,渣中包含的钢的颗粒(被包含在渣内的,单独存在的小钢粒,在浇入砂型后随渣流出)也会增加,如图4-5-1所示,使铝热钢的实际收得率降低。因此,在有些热剂中,可加入提高熔渣流动性的熔剂,如氟化钙等,使钢的收得率提高到99%。由此可见,为了获得质量良好的铝热钢,应该控制熔渣—钢液间的各种反应。熔渣的一般情况可以从渣的颜色来判断,如氧化性强的渣,颜色发黑;碱度高而氧化铁含量少的渣,颜色从灰到白;酸性渣的颜色发绿;含 MnO 高的渣为深褐色;正常的铝热钢的熔渣是棕褐色。

2. 铝热钢的脱氧、镇静和含铝量

脱氧就是去除钢中的氧,以得到符合使用要求的焊缝金属及防止钢液在浇入铸型后产生气孔等缺陷。

从铝热反应式可以看出,与一般炼钢过程的脱氧相似,铝热钢的脱氧主要由铝对氧化铁的还原程度来决定。而加入钢中的硅和锰等元素也可以使脱氧进行得更完全。当铝热反应尚未进行完全就浇注时,由于铝对氧化铁的还原不完全,因此在进入砂型后,游离的氧化铁会继续与钢中的易与氧结合的元素起作用(例如 C 、 Mn 、 Si 等),使钢的成分不稳定,并且在与 C

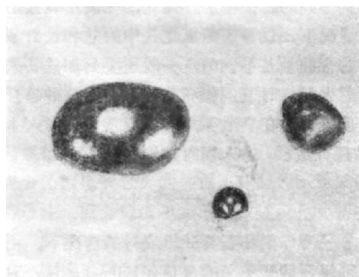


图4-5-1 包含在渣中的钢的颗粒

作用时生成的气体，会在焊缝内形成气孔。铝热反应进行的程度不同，在反应完成前后的不同阶段，钢中的含铝量也是不同的。铝热钢中的质量分数一般为 0.25% ~ 0.65%，这样的含铝量可以保证钢的脱氧完全，并有一部分铝可以起到细化晶粒的作用。钢中铝的质量分数过高（超过 0.7%）则容易引起脆断。同时，镇静时间过短，反应过程中产生的气体不能充分逸出，会在焊缝中形成气孔及其他缺陷。图 4-5-2 是在铝热反应不同阶段将钢液浇入焊缝，焊缝金属含铝量的变化情况。图中纵轴为含铝量，横轴 I、II、III、IV 分别为四组试验测得的数据统计结果。从图中可以看出，当铝热反应中的沸腾基本平静后，在坩埚内镇静一定时间，焊缝含铝量较低。如果反应没有完全结束就浇注，焊缝中铝含量将会较高。如果钢液镇静时间过长，则钢液温度降低过多，在浇注后会在焊缝内产生较多的缺陷。因此，应该掌握好铝热反应进行的情况和必要的镇静时间。

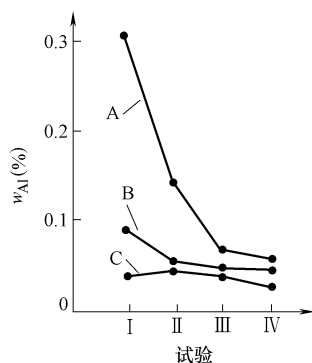


图 4-5-2 在铝热反应完成前后的各阶段钢中含铝量的变化

A—在反应进行时浇注 B—在反应完成后立即浇注 C—在反应完成 5s 后浇注

5.2 热剂焊材料

热剂焊的质量与热剂有直接关系，优良的热剂才能得到合乎质量要求的铝热钢。热剂的质量与热剂组成材料的选择、化学成分、物理状态、加工工艺和热剂的合理配方有关。所以热剂生产过程中应严格按照有关工艺要求，确保各组分的状态及工艺。从事热剂焊接人员必须对热剂的组成、性能、应用范围与保管方法等有一定的了解，才能更好地保管和使用热剂，在合理的焊接工艺配合下，避免缺陷的产生，从而获得优良的焊接效果。

5.2.1 热剂的组成及配方计算

热剂由两部分组成，一部分是其主要组成成分，包括铝粉、氧化铁、铁粉和铁合金等；另一部分是引燃材料，如高温火柴。

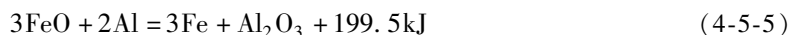
热剂的配方直接影响着热剂的质量，热剂的质量又是影响焊接接头质量的重要因素之一，因此，设计与确定热剂配方是较重要的问题。以铝热化学反应和冶金理论为基础进行热剂配方的计算，并根据各种配方组成材料的化学分析、力学性能检验进行必要的试验，以获得能够满足各项力学性能与化学成分要求的热剂配方。

热剂配方主要需确定以下三个问题。

1. 铝粉和氧化铁的配方比

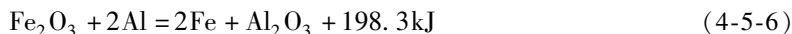
铝粉和氧化铁是热剂中的主要组成部分，以这两项为基础进行热剂的计算。从理论上说，铝粉和氧化铁的反应，要使氧化铁中的铁全部被还原出来而无剩余的氧化铁存在。铝除保证还原氧化铁外，还要求有微量铝过渡到焊缝中去，对钢起细化晶粒的作用。铝粉-金属铝含量（即铝粉中实际能与氧化铁起作用的部分），氧化铁以及氧化铁中三氧化二铁（ Fe_2O_3 ）和氧化亚铁（ FeO ）含量为计算基础。

(1) 根据化学反应式氧化铁中 FeO 所需的铝量 根据化学反应式，见式 (4-5-5)，可以求出氧化铁中 FeO 和铝粉起化学反应时，每克 FeO 所需含铝量 d 。



通过计算，每 1g FeO 需 0.2503g 铝。

(2) 根据化学反应式氧化铁中 Fe_2O_3 所需的铝量 根据化学反应式 (式 4-5-6), 可以求出氧化铁中 Fe_2O_3 和铝粉起化学反应时, 每克 Fe_2O_3 所需含铝量 f 。



通过计算, 每 1g Fe_2O_3 需 0.3379g 铝。

(3) 热剂中铝粉加入量的近似计算 从式 (4-5-5) 和式 (4-5-6) 中, 可以求出热剂中 FeO 和 Fe_2O_3 分别所需的铝量 (即 d 和 f 值)。但由于热剂组成材料中的铝粉含金属铝量不同, 氧化铁中含 FeO 和 Fe_2O_3 的量在不同处理工艺下也不相同, 随着热剂氧化铁的 FeO 和 Fe_2O_3 含量不同, 要求铝粉的加入量也不同。

热剂中铝粉加入量可按照下列近似简化计算式计算:

$$Al_{\text{焊}} = \frac{bd + cf}{1 + bd + cf} \times \frac{H}{A_{\text{金}}} \quad (4-5-7)$$

式中 $Al_{\text{焊}}$ ——热剂中铝粉加入量 (g);

b ——氧化铁中氧化亚铁 (FeO) 的质量分数 (%);

c ——氧化铁中三氧化二铁 (Fe_2O_3) 的质量分数 (%);

$A_{\text{金}}$ ——热剂铝粉中金属铝的质量分数 (%);

H ——热剂量 (g) (这里仅包括铝粉和氧化铁)。

d 、 f 值可通过式 (4-5-5) 和式 (4-5-6) 求出。

(4) 热剂中氧化铁加入量 根据热剂中铝粉加入量的计算式 (4-5-6) 求得铝粉的加入量后, 可以由此求出氧化铁的加入量:

$$F_{\text{氧}} = H - Al_{\text{焊}} \quad (4-5-8)$$

式中 $F_{\text{氧}}$ ——热剂氧化铁中 ($\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$) 总量。

从以上分析可以看出, 热剂中铝粉和氧化铁的计算, 基本上是按照化学反应式, 但实际上, 由于考虑到铝粉中金属铝含量和氧化铁中杂质等因素, 因此式 (4-5-7) 和式 (4-5-8) 仅为近似计算式, 所以在计算实际用量时, 还应根据试验, 找出校正系数, 这样, 才能使所配制的铝热剂获得最好质量的效果。

2. 铁粉加入量

铁粉熔化需要熔化热, 铁粉加入的作用是调节热剂反应时的温度和增加铁液, 加入的数量和焊剂数量有关。预热法铝热焊时, 铁粉加入量占铝粉和氧化铁总质量分数的 10% 至 20%; 如果采用不预热铝热焊时, 铁钉头加入量应考虑少加或不加, 以便于提高铝热钢液温度。

3. 铁合金的加入量

铁合金的加入主要是使焊缝金属具有一定的化学成分和力学性能。铁合金在热剂中的加入量要根据铝热钢对化学成分的要求、铝热钢液重量、合金元素含量和铁合金的过渡系数而定。

铁合金加入量可以按照下式计算:

$$M = gm_1/Gm_2 \quad (4-5-9)$$

式中 M ——铁合金加入量 (g);

g ——铝热钢液重量 (g);

m_1 ——铝热钢液中该合金元素的质量分数 (%);

G ——合金元素过渡系数;

m_2 ——铁合金中该合金元素的质量分数 (%)。

总之, 热剂的配方计算是以上述各项为基础, 根据热剂组成材料的化学成分物理要求, 从理论上进行计算外, 更重要的是通过科学试验, 反复实践, 采用优选法等, 以求得最好的配合比。

5.2.2 热剂的生产

1. 热剂原材料的要求和加工工艺

原材料的化学成分的选择和加工工艺以及加工后材料的化学成分、颗粒度、各项材料的配合比等对热剂具有特别重要的意义。

(1) 铝粉 热剂中主要组成成分, 主要起还原氧化铁的作用。

工业用铝(铝的质量分数为 99.5%) 在 658℃ 熔化, 化学纯铝(铝的质量分数为 99.99%) 熔点为 660℃, 铝的沸点为 2000℃。

对加工后铝粉的化学成分一般要求铝粉中金属铝的质量分数应大于 98%, 杂质要少。

铝与空气接触很容易被氧化, 而铝热焊要求铝粉不被氧化, 因为氧化铝不但在反应中延缓了燃烧作用, 而且降低了还原能力, 影响焊接质量。所以制成的铝粉应避免潮湿, 有时由于储藏或处理不当, 可能形成氢氧化铝, 在高温反应下, 会产生水, 分解成氢和氧, 以致引起气孔等缺陷, 所以热剂除要求铝粉化学成分合适外, 一般对铝粉活性也有一定的要求。

铝粉粒度大小对反应速度影响很大, 粒度太大反应时间长, 而且热量损失大, 所以热剂对铝粉粒度有一定的要求范围。一般采用粒度小于 0.6mm 的铝粉, 并且要求不同粒度的铝粉按一定的比例进行配制。

(2) 氧化铁 热剂主要材料之一, 氧化铁一方面可以供给反应时需要的大量氧产生热量, 另一方面还原的铁可以作为焊接的填充金属。

氧化铁的 3 种化合物有不同的理论含氧量: 氧化亚铁(FeO) 的理论含氧量(质量分数) 是 22.22%; 三氧化二铁(Fe_2O_3) 的理论含氧量(质量分数) 是 30.0%; 磁性氧化铁(Fe_3O_4) 的理论含氧量(质量分数) 是 27.58%。

氧化铁是轧钢厂的废品, 最好要求热轧普通碳素钢时, 从钢材表面脱落的碎氧化铁皮。从氧化铁的来源方面, 希望能有固定不变的粒度范围和一定的化学成分, 氧化铁原料中氧化亚铁(FeO) 含量较高, 为了达到热剂要求的 FeO 和 Fe_2O_3 含量, 氧化铁皮可以通过氧化法增加氧含量。氧化铁的氧化是从表面氧化逐渐深入到颗粒内部, 所以氧化铁颗粒的表层由三氧化二铁组成, 而核心部分则由氧化亚铁组成, 在表层与核心之间还有一小层磁性氧化铁, 大颗粒的氧化铁中氧化亚铁的含量比小颗粒为高, 也就是说, 氧含量随粒度增大而减小。

焊剂一般要求氧化铁原材料 FeO 的质量分数在 60% 左右, 硫、磷杂质的质量分数都需在 0.05% 以下, 否则影响铝热钢含硫、磷量, 所以必须严格选择氧化铁原材料。

对加工后氧化铁化学成分的要求: 一般要求氧化铁中 FeO 和 Fe_2O_3 控制在一定的稳定范围内, 同时要求硫、磷的质量分数都必须在 0.05% 以下。氧化铁中主要成分是 Fe_2O_3 , 其次是 FeO , 磁性氧化铁含量很少, 所以要正确控制 FeO 和 Fe_2O_3 含量。假如 FeO 含量高, 那么 Fe_2O_3 含量就低, 同样数量的氧化铁, 供给铝粉的氧就要减少, 热剂就不能充分反应, 氧化铁就不能完全被还原, 就有多余的氧化铁进入焊缝内, 使焊缝质量受到影响, 所以一定要严格按照热剂技术规程要求进行控制。

氧化铁的粒度大小与热剂反应速度是直接有关的, 为了控制反应速度, 对氧化铁的粒度要有规定, 一般要求在一定范围内, 过细的氧化铁最好不使用, 因为这些小颗粒含硅酸盐最多。

氧化铁是热剂中含量最多并起主要作用的材料, 因此必须严格按照热剂技术规程加工。加工好的氧化铁应该使其氧化亚铁 FeO 含量、粒度在热剂要求范围内, 要干燥、无杂质、无油污。合格的氧化铁要储存好。如氧化铁存放超过规定的时间, 在使用前必须经过化学分析, 合格的方可使用。

随着技术进步, 氧化铁的加工工艺也在逐步简化。例如大部分生产商已取消焙烧工序。大大降低了生产过程的能耗。为了热剂的稳定反应, 控制 FeO 和 Fe_2O_3 的含量是必需的手段。对原料的适度氧化是非常必要的。

(3) 铁粉 为了控制铝热钢液温度和增加钢液生成量,在热剂中加入适量的铁粉。这里所指的铁粉并不一定是粉状物,有时是直径较小的铁片,有时是球状铁珠。其目的是控制热剂反应物的温度,有时也依赖其较高的含碳量来增加焊缝含碳量。

铁粉加入量较大,一般占热剂重量的10%。热剂的纯度很大程度取决于铁粉的纯度。如果依赖铁粉增碳,一定要控制铁粉的S、P含量。

(4) 铁合金 为了提高焊缝的强度和硬度,在热剂中,须加入一定数量的铁合金,例如锰铁、硅铁以及其他的铁合金等。其加入合金数量根据铝热钢的化学成分,以及对焊缝硬度、强度等力学性能的要求而定。

(5) 热剂的引燃物(高温火柴) 热剂的燃烧反应是用特制的引燃剂(高温火柴)点燃的。高温火柴燃烧温度在1300℃以上,它是由铝粉、镁粉和粘结剂等制成。

高温火柴由引燃层和高温层组成,将引燃层擦燃后即引燃高温层,发生剧烈燃烧,产生高温将热剂引燃。高温火柴要求化学性能比较稳定,在一般情况下不能燃烧,但在猛烈撞击下或与磷面摩擦时,即能发生燃烧。它容易受潮,受潮后水分不易去掉,致使燃烧温度降低,甚至擦不燃,保存时要特别注意。

高温火柴属于易燃危险品,必须妥善保管,避免受潮和撞击,不得与热剂混装和保存,未用完的火柴应放回塑料袋的火柴盒内。

2. 焊接钢轨用的热剂的制造

(1) 配制 热剂配方经研究试验,在化学成分和各项机械性能达到要求后,生产工厂要严格按照热剂技术规程要求备料配制。

(2) 称量、混合和包装 各种材料的称量要准确,尤其是铝,可用自动称量装置,分别称量每包热剂的铝粉、氧化铁、铁粉。对每包热剂单独进行混合,混合要求均匀,否则影响正常的铝热反应和钢液温度的均匀性,不能保证焊接接头的质量。混匀后把热剂放入塑料包装袋中,装好后复查重量,放入总包装袋中。整个过程应按照热剂技术规程进行,严防受潮,严禁烟火。

5.3 热剂焊工艺

5.3.1 准备工作 and 钢轨处理

热剂焊主要应用于铁路的钢轨焊接,主要介绍的热剂焊工艺为钢轨焊接工艺。

(1) 准备工作要求 主要要求如下:

1) 了解钢轨型号、类别,按强度等级的要求正确选择热剂。

2) 施工现场前对焊接工具、材料进行清点。

3) 对施工设备、可燃气瓶进行检查,确保使用安全可靠。

4) 焊接钢轨两侧15m范围内必须严格按照规定上紧扣件,确保焊接时轨缝间隙不得发生移动,影响焊接质量,甚至发生钢液泄漏。

(2) 轨端处理 操作要点如下:

1) 检查钢轨是否有损伤,母材如有缺口将使焊接合格率降低。

2) 对焊接钢轨端部、两侧和轨底进行打磨除锈,打磨范围为50mm,如图4-5-3所示。

3) 打磨完成后,轨头端部边缘需倒角 $c1$ 。

4) 必须对钢轨两端1m范围内进行烘干。

(3) 钢轨的对正 操作要点如下:



图4-5-3 打磨除锈

1) 预留轨缝调整, 以轨脚边为基准, 控制轨缝宽度为 (28 ± 1) mm。

2) 尖点的调整如图 4-5-4 所示。

将 1m 直尺的中点与焊缝中点重合, 用钢楔子或者对轨架进行尖点调节, 使焊缝两侧 0.5m 处钢轨行车面与直尺的间隙为 1.5~2mm。

3) 水平对正: 用 1m 直尺分别检查焊缝两端钢轨轨头、轨腰、轨底平直。如有偏差, 用对轨架或钢楔子进行调节。应注意磨损轨的焊接对轨时以行车面为准, 对轨非常重要, 可防止钢液泄漏。



图 4-5-4 尖点的调整

5.3.2 夹具和砂模的安装

1. 夹具的安装

- 1) 夹具安装要与轨面平行。
- 2) 预热枪支座如图 4-5-5 所示, 可以在预热过程中, 根据需要调整预热枪前后左右位置。
- 3) 在调节预热枪高度时, 首先调节预热枪与轨面平行。
- 4) 预热枪头到轨面的高度为 40mm, 如图 4-5-6 所示。
- 5) 多用塞尺可用于调节预热枪高度, 确定夹具安装位置, 测量焊缝的宽度。

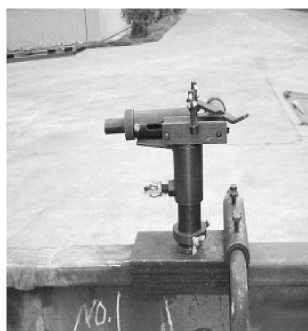


图 4-5-5 预热枪支座

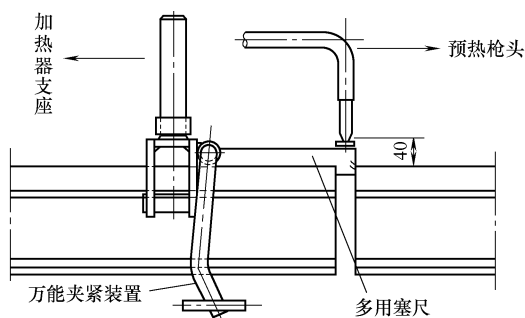


图 4-5-6 预热枪头到轨面高度

2. 砂模的安装

- 1) 观看砂型的外表有无裂痕或受潮, 如有裂痕或受潮则砂型不能使用。
- 2) 清理砂模浇注孔浮砂, 防止表面浮砂受高温脱落。
- 3) 将两片砂模贴在钢轨上进行单磨和对磨, 使砂型与钢轨几何尺寸密贴, 如图 4-5-7 所示。
- 4) 将磨好的砂模套上侧模板并安放在轨缝上, 砂模必须安装在轨缝的正中央并垂直, 如图 4-5-8 所示, 如果是三片模安装, 则先安装底模板, 然后安装两面侧模板, 如图 4-5-9 所示。
- 5) 安装夹紧装置时由一人稳住砂模另一人操作扭紧夹具。

3. 封箱和分流塞的安放

(1) 封箱 操作要点如下:

- 1) 封箱前, 要盖上砂型盖防止砂落入砂型中, 形成夹渣。
- 2) 在封箱过程中, 两侧模板之间的砂要略高与砂型, 防止钢液从两侧流出。



图 4-5-7 对模

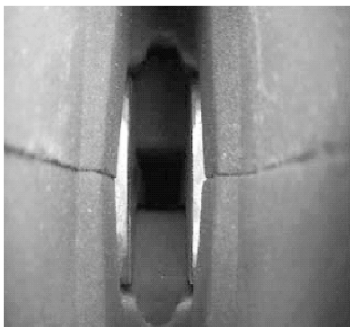


图 4-5-8 侧模对中

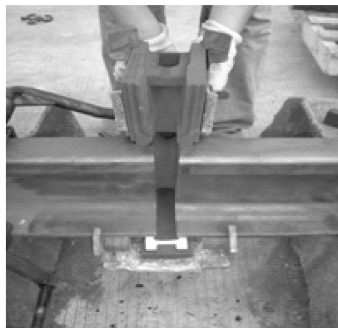


图 4-5-9 底模对中

3) 封箱完成后, 将灰渣盘安装好。

(2) 分流塞的安放 操作要点如下:

1) 分流塞在安放前要先经过试装, 过松或太紧均会给焊接质量带来影响, 如图 4-5-10 所示。

2) 在预热的过程中, 要对分流塞进行干燥。

5.3.3 热剂焊操作过程

1. 预热及其过程控制

(1) 工作压力的控制 氧气和燃气的工作压力分别是 0.35MPa 和 0.1MPa。

(2) 预热时间控制 预热时间 6 ~ 6.5min, 根据气候条件, 冬季可适当延长, 以达到预热效果。

(3) 预热火焰的调节 先稍微开启氧气阀门, 接着打开燃气阀门, 再点火。点火后逐渐交替打开两个阀门, 直到氧气阀门完全打开为止, 再通过调节燃气阀门来调节火焰大小, 使火焰的长度保持在 15 ~ 20mm, 火焰为中性火焰, 如图 4-5-11 所示。

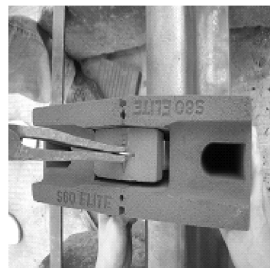
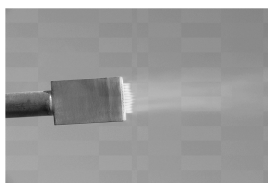
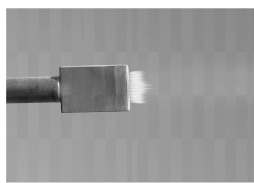


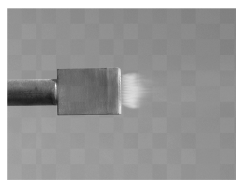
图 4-5-10 分流塞试装



a)



b)



c)

图 4-5-11 预热火焰

a) 氧化焰 b) 中性焰 c) 碳化焰

(4) 密切关注整个预热过程 在预热过程中, 应密切关注轨头受热后颜色变化过程, 轨头预热完成的温度为 950 ~ 1000℃, 如图 4-5-12 所示。

2. 焊剂高温反应

焊剂反应时间为 10 ~ 15s; 镇静时间为 10 ~ 18s。

5.3.4 焊后处理

1. 预拆除砂型卡具

浇注完成后 1min, 移去坩埚并将其放在干燥的

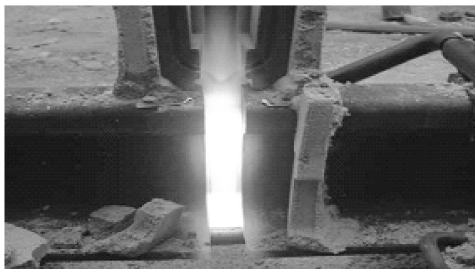


图 4-5-12 预热良好的接头

地方,然后移去灰渣盘并将灰渣倒入坩锅中,保持环境干净。浇注完成 4.5min 后,拆除侧模板和夹紧装置,如图 4-5-13 所示。



图 4-5-13 拆除砂型卡具

2. 推瘤

浇注完成 7min 后用推瘤机开始推瘤。浇注棒可在 20min 后打掉。推瘤时应注意以下问题:

- 1) 推瘤过早会因焊头硬度不够而拉伤轨面。
- 2) 推瘤过迟将给推瘤带来困难,如图 4-5-14 所示。



图 4-5-14 推瘤

3. 打磨

(1) 热打磨 推瘤完成后,就可以进行粗打磨。焊后 20min 后或温度降到 300℃ 才能放车通行。

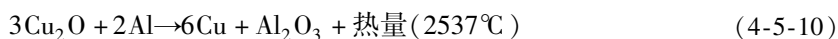
(2) 冷打磨 焊接接头完全冷却后可进行冷打磨,并按照规定要求打磨。

5.4 热剂焊的其他应用

5.4.1 导线的热剂焊特点

除用于铁路焊接钢轨外,热剂焊的另一个重要用途是用于电力工业中的接地线或导线的焊接。

导线热剂焊的反应式如下:



(1) 热剂焊过程的特点 放热焊接化学反应速度非常快,仅几秒就可以完成焊接,产生热量极高,可以有效地传导至熔接部位,使其熔为一体,形成分子结合,它无须其他任何热能。

(2) 热剂焊的性能特点 主要特点如下:

1) 电流负载能力大:经检测,导体熔焊前后的直流电阻率变化接近于零,熔接点的载流能力与导体相同,具有良好的导电性。这是任何一种传统连接方式都无法比拟的。

2) 抗大电流冲击能力强:试验表明,在大电流的连续冲击下,导体先于熔焊接头熔化,因而

不会受到浪涌电流的损伤。

3) 电阻转换稳定：试验表明，在正常电流和大电流之间振动冲击之下，熔接点没有出现电流火花，也没有发现熔接点损坏和电阻值改变的情况。

4) 力学性能良好：因为是熔融接头，所以其接头与导体是分子的结合，是一种永久性的接头。

5) 耐蚀性强：由于是熔融接头，没有接触表面，且接头被纯铜覆盖，因而大大增强了导体的抗腐蚀能力。

6) 操作简单安全：无需外界能源，无需专门装备。无需专业操作人员，室内、室外都可以操作，完成连接时间短。

5.4.2 导线的热剂焊及其接头形式

1. 导线的热剂焊接

以导线与接地棒的焊接（见图 4-5-15）为例，热剂焊工艺过程如下：

第一步：将导线及石墨模具用专用的工具清理干净，再将导线焊接处用喷灯加热，然后安置导线于石墨模具内备用。

第二步：用夹具将石墨模具夹紧，放入钢垫片盖住导流孔确保密封良好。

第三步：倒入焊粉并在上面洒上起燃药，并在模具顶部洒上一部分起燃药。

第四步：合上顶盖，用点火枪点燃。10s 之后，再打开模具。

2. 接头的形式

导线的焊接有多种接头形式。表 4-5-3 列出了部分接头形式，这些接头焊接原理都相似，只有模具有所区别。需要特别注意的是，在与钢材进行焊接时，要注意防止铜向铁的渗透形成的 Cu-Fe 中间相，这将严重影响钢的力学性能。

导线的热剂焊主要可焊接纯铜、黄铜、青铜、铜包钢、纯铁、不锈钢、锻铁、镀锌钢铁、铸铁、铜合金、合金钢等金属材料。广泛用于发电厂、变电站、输电线路杆塔、通信基站、机场、铁路、各种高层建筑、微波中继站、网络机房、石油化工厂、储油库等场所防雷接地、防静电接地、保护接地、工作接地等的焊接。

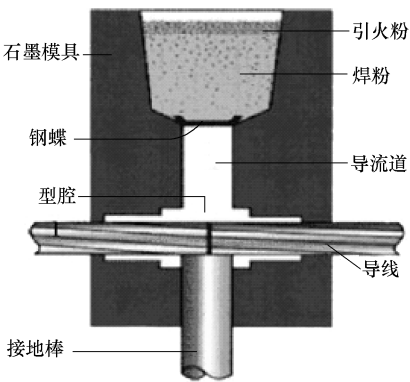
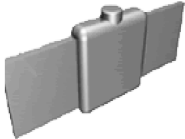
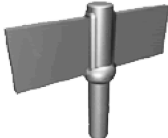
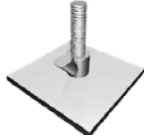


图 4-5-15 导线与接地棒的焊接

表 4-5-3 电力工业导线焊接的接头形式

1	导线与导线焊接		3	导线与接地棒(极)焊接	
2	导线与金属排(带)焊接		4	导线与金属板焊接	

(续)

5	金属排(带)与 金属排(带)焊接		7	导线与轨道焊接	
6	金属排(带)与 接地棒(极)焊接		8	金属棒与金 属板焊接	

参 考 文 献

[1] 李力, 崔成林, 范铧华等. 钢轨铝热焊工培训教材 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.

[2] 丁韦, 黄辰奎, 季关钰等. 钢轨及高锰钢辙叉焊工技术培训教材 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.

[3] 邹定强, 杨其全, 卢关键等. 钢轨失效分析与伤损图谱 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.

[4] 李致焕, 李华霖, 张勐宁等. 电气工程中的焊接技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

第 6 章 胶 接

胶接是指两个物体借助于胶粘剂而形成的一种连接，利用天然胶粘剂进行胶接的历史已非常久远，20 世纪 30 年代世界上开始利用合成胶粘剂进行胶接，由于其具有适应性强、结构重量轻等特点，很快在航空航天、交通运输、电子电器、建筑业、机械行业、医疗行业等领域得到广泛应用。通过胶粘剂选择、接头设计、表面处理和工艺优化等，胶接几乎可以适用于各种同质和异质材料的连接。

本章主要介绍胶接的特点及其机理、胶接工艺方法、胶粘剂及其性能测定和胶接的应用。

6.1 胶接的特点及机理

6.1.1 胶接的特点

胶接是指两个物体借助于胶粘剂的润湿、铺展，与胶粘剂分子或彼此分子间产生相互作用而形成的一种连接。与焊接、铆接、螺钉联接等方法相比，胶接具有许多独特的优点，主要表现在以下几个方面：

(1) 胶接对被粘材料的适应性强 胶接既可用于各种金属、非金属的连接，也可用于金属与非金属的连接。两种性质完全不同的金属以及金属和非金属之间是很难焊接的，采用铆接或螺钉联接容易产生化学腐蚀和应力集中，而采用胶接常获得较好连接的效果。

(2) 胶接能减轻结构重量 采用胶接可省去很多螺钉、螺栓等联接件，而且在设计结构时，由于无应力集中问题，可选用较薄的金属和非金属材料，因此，胶接可获得较大的结构减重，另外采用胶接可以制成蜂窝夹层结构，使结构重量大幅降低。

(3) 胶接接头为面面连接 应力分布均匀，应力集中较小，耐疲劳性能好。

(4) 选用胶粘剂实现所需的功能 功能性胶粘剂可赋予胶接接头较好的密封、绝缘、减振、隔热、隔音和抗腐蚀等性能。

胶接技术除以上优点外，也有如下不足之处。

- 1) 胶接强度比较低：一般仅能达到金属母材强度的 10% ~ 50%。
- 2) 使用温度低：长期工作温度不超过 150℃，仅有少数可在 200 ~ 300℃ 使用。
- 3) 胶接接头长期在湿气、水、介质、光、热和辐射等环境中使用时，易老化变质。
- 4) 影响胶接质量的因素较多，胶接件质量问题不易检测。

6.1.2 胶接的机理

胶接过程是一个复杂的物理、化学过程。胶接力的形成主要包括表面润湿、胶粘剂分子向被粘物表面移动、扩散和渗透，胶粘剂与被粘物之间形成物理、化学和机械结合的过程。胶接力的_{大小}，不仅取决于胶粘剂和被粘物表面的结构和状态，而且和胶接过程的工艺条件等密切相关。通常，胶接的机理主要有以下几种：

1. 吸附理论

吸附理论是 De Bruyne、McLaren 等人首先提出的，此理论认为，胶接产生的粘附力主要来源于胶粘剂与被粘物之间界面上两种分子之间相互作用的结果，所有的液体-固体分子之间都存在这种

作用力, 这些作用力包括化学键力、范德华力和氢键力。胶接过程中首先胶粘剂分子因布朗运动向被粘物表面移动, 胶粘剂分子的极性基团向被粘物的极性部分靠近, 当胶粘剂分子与被粘物分子间的距离小于 0.5nm 时, 分子间就产生了范德华力或氢键力的结合。吸附理论把胶接主要归结于胶粘剂与被粘物分子间力的作用。

根据吸附理论, 如果胶粘剂分子中极性基团的极性越大, 数量越多, 则对极性被粘物的胶接强度就越高; 极性胶粘剂与非极性被粘物或非极性胶粘剂与极性被粘物胶接, 由于分子间排斥, 不利于分子的接近, 不能产生足够的分子间力, 所以胶接力很差; 而非极性胶粘剂与非极性被粘物结合, 由色散力产生的胶接强度较小。

吸附力是提供胶接力的普遍因素, 但不是唯一因素。在某些特殊情况下, 其他因素也能起主导作用。

2. 扩散理论

扩散理论是由前苏联学者 Воюцкий 等人提出的, 此理论认为, 高分子材料之间的胶接是由于胶粘剂与被粘物表面分子或链段彼此之间处于不停的热运动, 从而引起相互扩散作用, 使胶粘剂与被粘物之间的界面逐步消失, 形成相互交织的牢固结合。如果胶粘剂是以溶剂的形式涂敷到被粘物表面, 而被粘物表面又能在此溶剂中溶胀或溶解, 则彼此间的扩散作用更为显著, 其胶接强度就越高。因为胶粘剂和被粘物间的相互扩散是产生胶接力的主要因素, 胶接强度与它们的相容性有关。高分子材料之间的胶接可以分为同种高分子材料的自粘和不同种高分子材料的互粘。前者是同种分子间的扩散, 后者是不同类分子的扩散。两种扩散的结果都会使胶粘剂与被粘物分子交织在一起, 从而形成牢固的结合。若胶粘剂呈液态, 被粘物在液体中扩散作用显著, 有利于界面消失。

扩散实际上是一种溶解过程, 这个理论可以圆满解释同种或性质相近的高分子化合物之间的粘合。

3. 静电理论

前苏联学者 Дерягин 等人根据剥离某些胶接接头时产生放电现象, 提出了静电理论。此理论认为胶粘剂与被粘接材料接触时, 在界面两侧会形成双电层, 如同电容器的两个极板, 从而产生了静电引力。当两种不同的材料接触时, 胶粘剂分子中官能团的电子通过分界线向另一相表面定向吸附, 形成了双电层, 由于双电层的形成, 胶粘剂与被粘物之间就有静电力产生, 从而产生了胶接力。双电层理论只存在于能形成双电层的胶接体系, 并不具有普遍性, 在聚合物膜与金属胶接等方面, 静电理论占有一定的地位, 但不能解释导电胶的作用和非极性粘合等。

4. 机械结合理论

机械结合理论认为被粘物表面的不规则性, 如高低不平的峰谷或疏松孔隙结构, 有利于胶粘剂的渗入, 固化后胶粘剂和被粘物表面发生咬合而实现连接。经表面处理过的金属粘接, 多孔物质如纸、木材、皮革、纺织品等都是胶接的实例。

机械结合的关键是被粘物表面必须有大量的凹穴、槽沟、孔穴等, 当胶粘剂涂布上去时, 经过润湿、流动、挤压、铺展而填入这些孔穴内, 固化后, 就嵌入在孔隙中而将两个表面紧密地结合在一起。机械结合理论曾一度被冷落, 近 20 年来, 基于现代微观分析研究, 证明微机械嵌定作用是确实存在的。

胶粘剂种类、被粘材料种类和表面状态的不同, 在胶接过程中可能同时存在一种或几种结合机制, 各机制所起作用的大小和重要程度有所不同, 胶接理论还需在胶接技术的研究、开发和应用中进一步完善。

6.2 胶粘剂

6.2.1 胶粘剂的分类

胶粘剂的种类很多，目前还没有统一的分类方法。为了便于研究和应用，一般采用按化学成分、表观形态、固化方法和用途等对胶粘剂进行分类。

1. 按胶粘剂主要化学成分分类

根据胶粘剂使用的主要化学成分，胶粘剂可分为有机胶粘剂和无机胶粘剂两大类，见表4-6-1。

2. 按胶粘剂表观形态分类

按胶粘剂表观形态，可将胶粘剂分为液体型、膏糊型和固体型三大类，见表 4-6-2。

3. 按胶粘剂固化方法分类

按固化形式的不同，可将胶粘剂分为溶剂挥发型、化学反应型和热熔型三大类，见表 4-6-3。

表 4-6-1 胶粘剂按主要化学成分的分类

分 类		化 学 成 分	典 型 品 种
有 机	合 成 类	树 脂 型	热固性-脲醛、酚醛、环氧、不饱和聚酯、聚氨酯、丙烯酸酯、有机硅、聚酰亚胺等
			热塑性-聚乙烯酯、丙烯酸酯聚酰胺、纤维素、饱和聚酯等
		橡 胶 型	氯丁、丁基、丁苯、硅橡胶、聚氨酯等
		混 合 型	热固-热固、热固-热塑、热固-橡胶
	天 然 类	多糖衍生物-淀粉、阿拉伯胶等	
		氨基衍生物-植物蛋白、骨血胶等	
		天然树脂-木质素、松香、生漆等	
无 机		硅酸盐、磷酸盐、硫酸盐、金属氧化物等	

表 4-6-2 胶粘剂按表观形态分类

分 类	表 观 形 态	典 型 品 种
液体型	水溶型	聚乙烯醇、脲醛、酚醛、纤维素等
	乳液型	聚醋酸乙烯、聚丙烯酸酯、环氧、不饱和聚酯、氯丁、丁腈、天然橡胶等
	有机溶剂型	聚醋酸乙烯、氯丁、丁腈、天然橡胶、环氧、酚醛等
	无溶剂型	环氧、不饱和聚酯、丙烯酸聚酯腈基丙烯酸酯等
膏糊型	经填充物填充的各种液态胶粘剂	
固态型	粉状	淀粉、聚乙烯醇、阿拉伯胶等
	片状、块状	热熔胶、松香、鱼胶、骨胶等
	膜状	酚醛-缩醛、酚醛-丁腈、环氧-丁腈、环氧-聚砜、环氧-聚酰胺等

表 4-6-3 胶粘剂按固化方法分类

分 类	固 化 方 法	典 型 品 种
溶剂挥发型	溶剂从胶面挥发,形成胶粘膜而产生胶接力。是一种物理可逆过程。固化速度随环境温度、湿度、胶接面大小、加压方式及被粘材料疏松度有关	聚氨酯、聚醋酸乙烯酯、酚醛、丁苯橡胶、氯丁橡胶、腈基橡胶等
化学反应型	由不可逆的化学反应引起固化,从而实现粘接。按配制方法可分为单组分、双组分和多组分,按固化条件可分为室温固化和加热固化	脲醛、酚醛、环氧、聚酰亚胺、不饱和聚酯、聚氨酯、丙烯酸双酯、有机硅腈基丙烯酸酯、聚硫橡胶、硅橡胶等
热熔型	以热塑性聚合物为基体,通过加热使之熔融进行胶接,冷却后产生胶接力。也是一种物理可逆过程	乙烯-醋酸乙烯共聚物、聚酰胺、聚酯等

按胶粘剂固化后的性能特点,可将胶粘剂分为结构型、非结构型和次结构型。结构型胶粘剂是在承受较大载荷和较苛刻环境下不会失效,且在预定时间内性能没有大幅度下降的胶粘剂,结构型胶粘剂多为混合型,如酚醛-橡胶(热塑性塑料)、环氧-橡胶(热塑性塑料)等;非结构型胶粘剂一般不能承受较大的载荷,且在苛刻环境下会出现明显的性能下降,通常用于承力较小的制件或作定位及特殊功能用,如淀粉、蛋白、丙烯酸和醇酸树脂胶粘剂等;次结构型胶粘剂的物理性能和力学性能处于结构型胶粘剂和非结构型胶粘剂之间,主要品种有酚醛、脲醛、有机硅、聚氨酯等。

6.2.2 胶粘剂的选择

1. 基本原则

胶粘剂最基本的作用是将不同构件连接起来并满足特定的要求。在选择胶粘剂时应综合考虑胶粘剂的性质、被粘材料形式和状态、接头应力状态、使用环境、工艺要求、成本和操作环境等因素进行各方面的权衡,从而选择满足具体需要的最佳胶粘剂。离开了具体的要求,胶粘剂的好坏是无从谈起的。

2. 胶粘剂选择的几个关键问题

(1) 被粘材料的种类和性质 选择胶粘剂时需考虑的重要因素主要是胶粘剂和被粘材料的匹配,这些匹配主要包括强度匹配、模量匹配、韧性匹配、热膨胀系数匹配和化学性质匹配。强度匹配即所选胶粘剂的内聚强度和胶接强度与被粘材料强度相当,如对于强度较低被粘材料就没有必要选择内聚和胶接强度较高的胶粘剂,而强度高的被粘材料则应选择较高内聚和胶接强度的胶粘剂,选择的最理想的状态是当胶接接头破坏时同时发生被粘材料本体破坏、内聚破坏和粘接破坏。模量匹配是根据不同被粘材料的弹性模量选择恰当的胶粘剂,一般理想的胶粘剂模量应接近两种被粘材料模量的平均值。不同韧性或变形能力的材料进行粘接时,应恰当地选择胶粘剂的韧性,即韧性匹配。对脆性材料的胶接,如陶瓷-陶瓷或陶瓷-玻璃,可选择脆性的胶粘剂,如未增韧的酚醛、脲醛和环氧等;对韧性材料的胶接,如橡胶、织物等,就必须选择韧性好的橡胶类胶粘剂;对韧性材料和脆性材料之间的胶接,如橡胶-陶瓷、橡胶-金属或塑料-金属等,胶粘剂应选择具有较好韧性的体系,一般胶粘剂的断裂延伸率应不小于两种被粘材料断裂延伸率的平均值。对不同被粘材料进行加热粘接时,因它们的热膨胀系数不同,会在胶层产生应力,选择胶粘剂时应考虑使胶层具有较好的韧性或变形能力及较高的胶接强度,以避免因残余应力而发生破坏,尤其是在温度变化较大的环境中工作的胶接件更应重视这一问题。许多胶粘剂中含有溶剂或可能对被粘材料有腐蚀作用的组分,因此,所选胶粘剂不应对被粘材料形成破坏性的溶解或腐蚀。

(2) 胶接接头使用工作条件 胶接接头的受力状态是首先需要考虑的问题。受力状态有四种基本形式,即拉伸、剪切、撕裂和剥离。选择胶粘剂时应分析接头所承受应力的形式和大小,找出主次,选用能满足主要应力要求并兼顾其他应力形式的胶粘剂。一般来讲,未增韧的合成树脂类胶粘剂,如丙烯酸类、酚醛类及环氧类等具有较高的抗拉伸和抗剪强度,而剥离和撕裂强度较差;橡胶类胶粘剂则具有较好的剥离和撕裂强度,而抗剪和抗拉强度不足;结构胶粘剂一般为经增韧的树脂类胶粘剂,这类胶粘剂具有较全面的性能。

当接头应力为持久应力、动态应力或冲击应力时,应选择强度高且韧性较好的胶粘剂。

接头使用温度是选择胶粘剂的另一个重要条件。胶粘剂的温度特性包括三个方面的问题,即耐热性、耐寒性和耐冷热疲劳性能。

温度升高时,胶粘剂的性能会有不同程度的下降,因此所选胶粘剂应在接头使用温度下保持足够的强度。一般情况下,胶粘剂强度保留率下降到室温强度的1/3时的温度为胶粘剂使用温度的上限。在低温情况下,胶粘剂会变脆,从而使剥离强度和撕裂强度下降,再加上因接头热膨胀系数的

差异会导致较大的胶层应力，所以，接头在低温下使用时，必须选用韧性、弹性好或玻璃化温度较低的胶粘剂。

冷热交替使用时，胶粘剂应具有良好的高温和低温性能及非常好的韧性，能满足这些条件的胶粘剂一般为经过良好增韧的树脂类或耐热性好的橡胶类。

接头所处的环境条件也是选择胶粘剂时需要考虑的问题，其中最重要的是潮湿（或水浸）环境和有化学介质的环境。水几乎可以渗入所有的胶粘剂和胶接界面中，使胶粘剂内聚强度和胶接强度降低，因此，有水环境中应选吸水率低的胶粘剂，并对被粘材料进行适当的表面处理。对于化学介质环境中的胶接，所选胶粘剂应尽量不发生溶解、膨胀或腐蚀老化。

（3）胶接工艺要求 胶粘剂的种类很多，不同种类胶粘剂的工艺性差别很大，应根据不同胶接接头制备的工艺要求，选择适宜的胶粘剂。胶粘剂的工艺性主要包括以下几个方面：胶粘剂状态、施胶方法、储存期、适用期、涂胶贴合时间、干燥时间、固化温度、固化压力和固化时间等。

胶粘剂的状态一般有液态、膏状和固态（或膜状）。液态胶粘剂适合喷涂或刷涂，膏状适合刮涂，膜状胶适合铺放。选择何种状态的胶粘剂要根据接头的形状和尺寸、制件数量、施胶工具、工装和设备等来决定。一般结构胶粘剂和次结构胶粘剂都需在一定温度和压力下固化，这样不但可以提高胶接接头的耐热性，还可以提高胶接的强度和耐久性，但对工艺装备提出了一些要求。对某些大型复杂部件或被粘材料不能承受高温高压时，需权衡工艺和性能要求，选择具有恰当温度和压力工艺参数的胶粘剂。

另外，选择胶粘剂时还应考虑胶粘剂的气味、毒性和是否为易燃易爆品等安全性，并采取相应的防护措施。

以上仅为选择胶粘剂时应考虑的基本问题，当在重要结构上使用胶粘剂时，还应详细研究具体胶粘剂的各种性能数据，包括工艺性能、物理性能和力学性能等，必要时应与胶粘剂的生产厂商取得联系以获得技术支持。

表4-6-4～表4-6-7给出了国内常见胶粘剂，根据用途将胶粘剂分成通用胶粘剂（见表4-6-4）、结构胶粘剂（见表4-6-5）、软质材料用胶粘剂（见表4-6-6）和特种胶粘剂（见表4-6-7），其实各类之间并无严格的界定，这样分类仅为选用时方便。这里通用胶粘剂一般指常温固化（当然也可加热固化），耐温范围在-50～60℃，室温下具有较好的胶接强度，可用于金属、陶瓷、混凝土、塑料和木材等的胶接，（化学）组成可为合成树脂或橡胶等；结构胶粘剂是指可承受较大载荷，综合性能好，耐温80℃或以上，耐环境老化的胶粘剂，一般为经增韧的酚醛、环氧中温或高温固化的胶粘剂，多用于金属的胶接；软质材料用胶粘剂为韧性较大的胶粘剂，一般为天然或合成橡胶、聚氨酯、软质塑料等，多用于织物、皮革之间或与金属及非金属的胶接；特种胶粘剂指具有某种特殊功能的胶粘剂。

表 4-6-4 通用胶粘剂

主要组成	特 点	用 途	主 要 牌 号
α-氰基丙烯酸酯	单组分、室温瞬间固化	各种金属、非金属的定位、装配等	502 胶、KH501、CAE-150
丙烯酸酯	双组分、室温快速固化、抗剪强度较好	胶接金属、陶瓷、硬塑料和木材等	SGA-806、SGA-809、J-39、J-50、铁锚301 等
酚醛类	双组分、室温或加热固化、抗剪强度好、耐温可达60℃，较脆	胶接各种金属、陶瓷木材、热固性塑料	铁锚 205、铁锚 206、铁锚 2123、铁锚 2127 等
环氧类	双组分、室温或加热固化、耐温可达60℃，综合性能好	胶接各种金属、陶瓷、硬质塑料和木材等	SY-40、SY-37、SY-36、SY-21、SY-TG3、HY914、E-11、CJ-90、DG 系列

表 4-6-5 结构胶粘剂

主要组成	特 点	用 途	主 要 牌 号
酚醛类	单组分或双组分、液状或膜状、固化温度 100 ~ 180℃, 耐温 100 ~ 150℃, 综合性能和耐老化好	多用于金属结构件胶接	J-01、J-03、J-15、铁锚 705、铁锚 201、E-4 等
环氧类	单组分、液状或膜状、固化温度 120 ~ 177℃, 耐温 100 ~ 150℃, 综合性能和耐老化好	金属材料结构胶接	SY-14、SY-24、J-116、J-99 等

表 4-6-6 软质材料用胶粘剂

主要组成	特 点	用 途	主 要 牌 号
改性氯丁橡胶或天然橡胶	单组分或双组分, 室温硫化, 使用温度 - 40 ~ 60℃, 剥离强度高, 剪切地强度低	织物、皮革、橡胶、塑料以及这些软质材料和刚性材料的胶接	XY-507、XY-515、XY-401、XY-402、88、CR-202、FN-309、铁锚 801、Jx-19-1
聚氨酯	双组分或单组分, 室温或加热固化, 耐温 - 40 ~ 80℃, 韧性好耐环境和介质性能好	织物、皮革、橡胶、塑料以及这些软质材料和刚性材料陶瓷、金属及玻璃等的胶接	PU-816、铁锚 107、101, 长城 405、GH-201、SUR、PU-1

表 4-6-7 特种胶粘剂

主要组成	特 点	用 途	主 要 牌 号
改性氯丁橡胶或天然橡胶	单组分或双组分, 室温硫化, 使用温度 - 40 ~ 60℃, 剥离强度高, 剪切地强度低	织物、皮革、橡胶、塑料以及这些软质材料和刚性材料的胶接	5287、6422 等
聚氨酯	双组分或单组分, 室温或加热固化, 耐温 - 40 ~ 80℃, 韧性好耐环境和介质性能好	织物、皮革、橡胶、塑料以及这些软质材料和刚性材料陶瓷、金属及玻璃等的胶接	MS1-j、30 号、P-32、P-36 等
胶接点焊胶	双组分或多组分、耐温 - 60 ~ 60℃, 良好的静态和疲劳强度、耐工艺湿热和介质	金属材料的胶接点焊或普通胶接	SY-H2、425、KH-120、等
耐高温双马来酰亚胺	单组分、175 ~ 200℃ 固化、长期使用温度 180-200℃, 短时耐温可达 350℃	高温使用金属或陶瓷的胶接	SY-71、SY-73、DAD-x 系列、J-17、等
耐高温聚酰亚胺	单组分、200 ~ 280℃ 固化、长期使用温度 200 ~ 350℃, 短时耐温可达 450℃	高温使用金属或陶瓷的胶接	SY-P1、P3、P9、J-29、60、118

6.3 胶接工艺

6.3.1 胶接接头的设计

1. 基本原则

胶接工艺过程比较复杂。这种连接方式具有其鲜明的优点，但也存在许多弱点，因此，在设计胶接接头时必须注意发挥其长处，克服其不足。应遵循以下一些基本原则：

- 1) 合理增大胶接面积，以提高接头的承载能力。
- 2) 除橡胶类胶粘剂外，大多数胶粘剂的抗拉强度（或均匀扯离）和抗剪强度较高，而剥离和不均匀扯离强度较低。在设计接头时，应使受力方向在胶接强度最大的方向，要尽量减少或降低胶层承受的剥离和劈开应力，并尽可能避免应力集中。
- 3) 应保持胶层的连续性和合理的厚度，避免局部欠胶。
- 4) 尽可能简化胶接工艺。
- 5) 综合考虑接头的受力形式和环境条件。

2. 胶接接头设计的几个重要问题

实际使用中胶接接头形式很多,但都可简化为端接(包括对接和搭接)接头、角接接头、T形接头和面接接头四种基本形式,如图4-6-1所示。

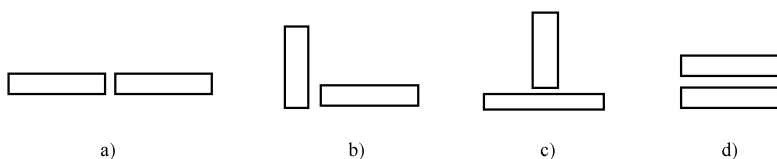


图4-6-1 胶接接头的基本形式

a) 端接接头 b) 角接接头 c) T形接头 d) 面接接头

实际使用中胶接接头受力状态比较复杂,为了分析方便可把它们简化为剪切、拉伸、不均匀扯离和剥离四种典型的受力形式,如图4-6-2所示。

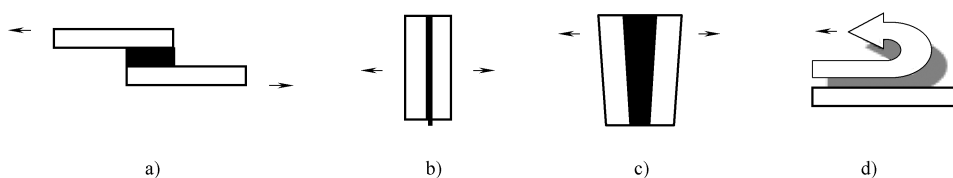


图4-6-2 胶接接头的典型受力形式

a) 剪切 b) 拉伸 c) 不均匀扯离 d) 剥离

不同胶接接头承受各种应力的能力是不同的,且受许多因素的影响,因此设计胶接接头时必须注意以下几个问题:

(1) 尽量将接头设计成受剪切状态 受力和试验表明,对接接头和搭接接头的承载能力较好。对一般胶粘剂而言,对接接头的承受的拉力为等面积搭接接头承受剪切力的2~6倍,是不均匀扯离的5倍,是剥离力的50倍;搭接接头的剪切力是不均匀扯离力的3~20倍,是剥离力的30倍以上。因此,无论什么情况下,都应避免将胶接接头设计成受不均匀扯离和剥离载荷的形式,而应设计成受拉伸和剪切的对接和搭接形式。就对接和搭接而言,实际应用中多采用搭接形式,这是因为对接接头的胶接工艺和制造较困难,除非被粘材料为很厚的板材或很粗的棒材,一般对接时很难保证载荷完全垂直于胶接面,导致载荷转变成不均匀扯离或剥离状态,从而使接头容易破坏。所以,将胶接接头设计成受剪切状态的搭接形式最为合理。以下举例说明几种接头的设计改进方式:

1) 对接接头的改进方式,对接接头的胶接面积小,除拉力外任何方向的力都容易形成不均匀扯离力而造成应力集中,所以胶接强度很低,一般不采用。必须采用时要将对接头进行适当改进,如图4-6-3所示。

2) 角接接头的胶接面积小,并且所受的是不均匀扯离力,强度较低,应避免采用,必须采用时应采取一定的改进措施,如图4-6-4所示。

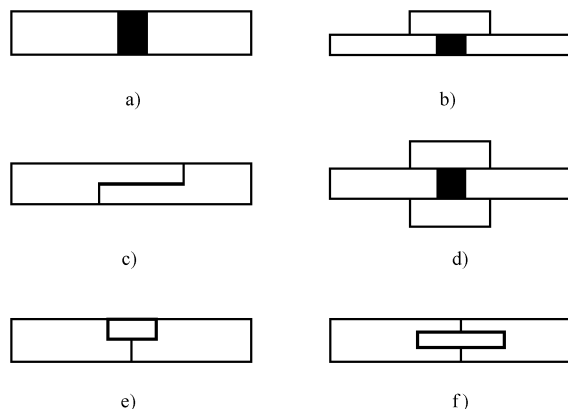


图4-6-3 对接接头及改进方式

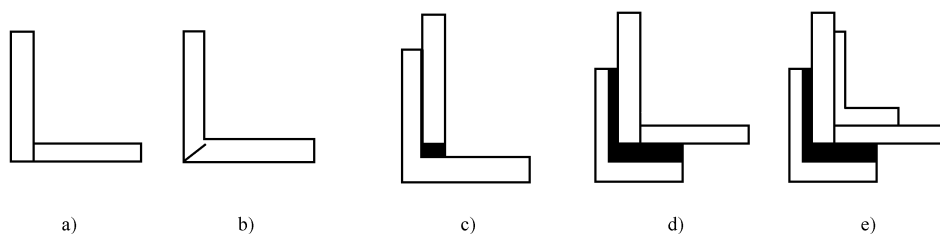


图 4-6-4 角接头及改进方式

3) T 形接头的胶接强度也较低,一般也不允许使用,必须采用时应进行改进,改进方式如图 4-6-5 所示。

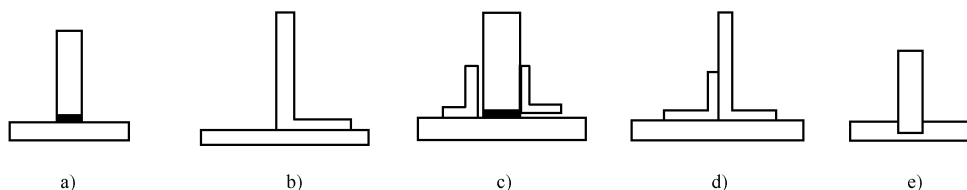


图 4-6-5 T 形接头及改进方式

(2) 尽量避免应力集中 胶接接头是结构上不连续的部分,通过它把应力从一部分传递到另一部分。胶接接头是由许多部分组成的,它们的物理性能和力学性能差别较大,因此在不同环境和承受载荷时应力分布非常复杂,很容易造成应力集中。

图 4-6-6 为典型的搭接接头。

从理论上讲,当接头上作用一个拉力或压力 F 时,胶接面主要承受剪切应力,但实际上,力的作用线不可能恰好在胶缝平面,从而产生一个弯矩作用在接头上,使被粘件发生变形,被粘件端部变形最大,这样,胶接面不但承受剪切应力而且承受垂直于胶接面的拉应力,应力在胶缝端部最大,从两端往中间逐渐减小,端部的应力集中会产生严重的不均匀扯离或剥离,使胶接强度降低。下面公式给出了接头的剪切应力集中系数 n (最大应力/平均应力):



图 4-6-6 典型的搭接接头

$$n = \sqrt{\frac{Gl^2 E_1 \delta_1}{E_2 \delta_2 (E_1 \delta_1 + E_2 \delta_2)}} \coth \left(\sqrt{\frac{Gl^2 E_1 \delta_1}{E_2 \delta_2 (E_1 \delta_1 + E_2 \delta_2)}} \right)$$

式中 l ——搭接长度 (mm);

δ_1, δ_2 ——两被粘物厚度 (mm);

G ——胶粘剂剪切模量 (GPa);

E_1, E_2 ——两被粘物模量 (GPa)。

从上式可以看出, G 、 E_1 、 E_2 和 d 可视为常数,而影响应力集中系数的参数为搭接长度 l 和被粘物厚度 δ_1 、 δ_2 。增加搭接长度会增加胶接面积从而增加接头的承载能力,但随着 l 的增加,应力集中系数也会增大,又使承载能力下降,因此当搭接长度增加到一定程度后,再增加搭接长度对提高接头承载能力效果就会大大减小,而只会增加应力集中系数。

总之,理论分析和实验表明,减小胶接面应力集中可采取以下措施:

- 1) 在一定范围内减小搭接长度。
- 2) 在一定范围内增加被粘物宽度。

- 3) 采用刚度不大于被粘物刚度的胶粘剂，胶层要有适当的厚度。
- 4) 尽量采用热膨胀系数相近的胶粘剂和被粘材料，减小内应力。
- 5) 采用恰当的胶接工艺，避免胶层缺陷。

6.3.2 表面处理

1. 表面处理的作用和过程

胶接区别于焊接或铆接之处就是存在着异质材料的界面粘附问题。为了保证粘接的质量，要求被粘材料的表面具有一定的粗糙度和清洁度，同时还要求材料表面具有一定的化学或物理的反应活性。因此，在进行粘接之前，必须进行材料表面的清洁处理和表面活化处理，统称表面处理，通过正确的表面处理可使粘接件的破坏发生在胶层内部（内聚破坏）或者发生在被粘接材料之中。从胶接强度的角度来看，胶接材料表面处理好坏的依据是界面粘附强度是不是大于或接近胶层材料的内聚强度。在进行表面处理时，应充分考虑以下几点：

- 1) 被粘材料的种类，其机械加工特性和化学腐蚀特性。
- 2) 原材料被污染的情况，包括污染层厚，污染层紧密程度，表面污染层密度程度，表面污染物的种类和性质。
- 3) 粘接结构的使用性能要求，例如短时力学性能、长时耐久性能等。
- 4) 设备投资、人员素质、工作场地的限制等因素。

2. 表面处理方法

表 4-6-8 给出了不同材料的表面处理方法。

表 4-6-8 不同材料的表面处理方法

处理方法	处理液比例(重量比)	处 理 方 法
钢铁	磷酸(85%):乙醇=1:2	三氯乙烯或汽油清洗 打磨或喷砂 在 60℃处理液中浸泡 10min,流水清洗,120℃干燥 1h
铝及铝合金	化学处理:重铬酸钾:浓硫酸;蒸馏水=1:10:30	丙酮或三氯乙烯清洗 打磨 在 60~70℃处理液中处理 10min,流水清洗,60℃干燥 30~60min
	磷酸阳极化,硫酸阳极化等	
不锈钢	重铬酸钾:浓硫酸:蒸馏水=3.5:200:3.5	丙酮或三氯乙烯清洗 打磨 在 70~75℃处理液中处理 15~20min,流水清洗,95℃干燥20~30min
铜和铜合金	三氯化铁(42%水溶液):浓硝酸:蒸馏水=15:32:200	丙酮或三氯乙烯清洗 打磨 在室温处理液中处理 1~2min,流水清洗,95℃干燥 15~20min
一般塑料	重铬酸钾:浓硫酸:蒸馏水=5:100:8	丙酮或三氯乙烯清洗 在处理液中处理:PE、PP,25℃,1h 或 70℃,2~5min;其他塑料酌减时间和温度 流水清洗,自然晾干
聚四氟乙烯	12.8g 升华萘与干燥的四氢呋喃 100ml 搅拌溶解,再在气氛保护下加入钠,成处理液	丙酮或三氯乙烯清洗 在处理液中室温处理 10min,流水清洗并干燥

6.3.3 胶接工艺过程和方法

表 4-6-9 列出了胶接工艺的一般内容和流程以及针对这些工艺采用的一些配套技术。

表 4-6-9 胶接工艺的一般内容和流程

流程	工 艺 内 容	先进配套技术	流程	工 艺 内 容	先进配套技术
1	表面处理	自动连续化处理线	4	固化	自动程序控制固化 结构共固化 红外、微波、辐射固化
2	涂胶	机械手定位喷涂 胶膜自动铺放			
3	组装	机械手操作			
			5	检验	超声无损检测

胶接工艺可以手工施工，也可以机械化施工。手工胶接的工艺要领有以下几点：

- 1) 根据胶粘剂的种类和性质选择合适的涂胶工具如毛刷、喷枪或注塑针等。涂胶应均匀而不含气泡，胶膜厚度一般应控制在 0.05 ~ 0.20mm。
 - 2) 涂完胶以后，晾置时间应控制在胶粘剂的允许的适用范围内，同时应避免开放状态的胶膜吸附灰尘或被污染。
 - 3) 组装定位应准确，合拢后应避免反复错动，避免气泡残留在胶层内。
 - 4) 正确选择固化参数。
- 机械化和自动化技术的应用对保证胶接质量和提高效率具有重要作用。

6.3.4 固化工艺参数

反应型胶粘剂固化过程是一个化学反应过程，正确选择固化工艺参数是很重要的。控制反应型胶粘剂固化工艺的理论基础是化学反应动力学。其基本参数是反应时间、反应温度、压力等。

1. 反应时间

当一个化学反应的温度恒定以后，体系中反应物各组分的浓度比例将随反应时间的延长而发生变化。反应开始时，反应物各组分的浓度最高，体系的反应活性最大，因此反应速度最快。随着时间的增长，反应速度非常缓慢，而这时胶粘剂内聚强度已基本建立，因此一般认为反应达到约 90% 的程度时，固化就已经完成。

2. 反应温度

温度是影响化学反应速度最敏感的参数，一般反应温度每提高 10℃，反应速度增加约一倍。此外，反应温度的高低还将影响反应产物的结构与性能（如交联度、内聚强度和粘附强度等），许多胶粘剂具有较宽的反应温度调节范围，因此可以通过调节固化反应的温度参数未达到预定的力学性能。反应时间和反应温度的选择和确定一般应遵循胶粘剂产品说明书的规定，但对大型复杂件的胶接，应充分考虑胶接件和工装等的传热特性和温度梯度分布，适当调整固化温度，并经充分验证后形成构件的固化温度。

3. 压力

固化反应时施加压力主要有以下几个作用：

- 1) 缩聚反应时平衡低分子物挥发的压力。
- 2) 使可溶性胶液中残留的溶剂排出。
- 3) 提高反应产物（胶层）的强度。
- 4) 控制胶层厚度。

一般来讲，胶接强度先随压力升高而提高，但超过一定压力后则会下降，这是因为过高的压力将挤出胶液，造成胶层过薄。从工艺角度讲，整个胶粘面积上固化压力要均匀，并且保证胶层具有一定的厚度（0.05 ~ 0.20mm）。

6.3.5 胶接质量控制

胶接工艺是一个多工序的复杂过程，每一步都对胶接的质量影响很大，因此为了保证胶接质

量,必须使每道工序都处于受控状态。胶接质量控制的要素主要有环境、设备和仪器、胶粘剂和辅助材料、工艺过程和参数、检验和人员素质等。

胶接厂房和场地要保持干净整洁,对于要求较高的胶接产品的生产,还应在封闭连续的净化空间中进行,并符合有关环境要求。一般环境控制要素有温度、湿度、粉尘和其他污染物等,这些要素在胶接过程中要进行适当的控制并记录。

设备如涂胶机、烘箱、热压机和热压罐等应定时检修使其在良好状态工作,计量器具、测量仪器仪表和传感器应保持足够的灵敏度并定期校验。

胶粘剂使用前应检查包装是否破损,胶粘剂是否被污染。胶粘剂和一些辅助材料一般都有一定的储存期限,使用前应了解胶粘剂已储存的时间和是否在满足相应技术条件的环境中贮存,避免使用过期的胶粘剂和辅助材料。

胶接工艺包括胶接件的预装、表面处理、涂胶、组装、固化、去除胶梗、检验等,胶接工艺过程的每一道工序要严格按照规定的工艺参数进行操作,每步检验合格后才进行下一步工作。

1. 胶接件的预装

待预装的胶接零件应有合格证。待预装的零件上(蜂窝芯除外)应无毛刺,其表面出现的划伤、凹痕、鼓包等缺陷应符合有关技术文件的规定。待胶接零件与工装的配合间隙应符合相关技术文件要求。经预装的零件应作标志(金属胶接面不准打钢印),并配套保管,防止混放。

2. 表面处理

除非另有规定,零件处理前应完成所有机加工和预装配工序。装挂零件要留有工艺耳子或足够的零件余量区。当处理的零件质量不合格时,如果尺寸容差允许每面去除金属大约 $13\mu\text{m}$,允许重复处理1~2次。金属零件胶接前按有关技术文件进行表面处理,零件表面处理质量检验按相应的技术文件规定进行。

3. 涂胶

每一正常班次均应彻底清洗、擦干与胶粘剂接触的工具、工作台、样板,涂胶的厚度应大于预装时的工艺间隙,并应在零件表面均匀涂上连续的胶层,避免局部缺胶。如需零件形成连续的胶梗,涂胶应有超过胶接区域5mm的余量。任何情况下涂胶区域不应小于待胶接区域的净尺寸。

4. 组装

工装、定位销、夹紧器及定位件均应按规定涂敷脱模剂,脱模剂在固化过程中不应污染胶接面。胶接件组装应符合相关技术文件的要求。对于复杂的组装件,应事先调位,不应强迫装配。

5. 固化

组装后的待胶接件应在胶粘剂的有效期内进行固化。固化工艺参数应符合技术文件的要求。在多阶段胶接中,总装配件的胶接固化应避免对已固化零件产生有害影响。在不影响胶接质量时可按有关技术文件规定中断加温,进行弥补操作。以滞后热电偶达到固化温度的下限开始计算保温时间。

6. 去除胶梗

当有特殊要求需要去除胶梗时,去除胶梗的操作应保证不损伤零件或胶接接头。胶接组件去除胶梗时,金属的去除不应超过最低标准,不应造成任何割伤或凿口。去除胶梗应遵循下列原则:

- 1) 当用机械方法去除时,首选打磨方法。
- 2) 其他方法都无效时才可使用刮刀。

7. 检验

(1) 非破坏性检验 目视检查胶接件外观是否有超出技术文件规定的缺陷存在。应根据产品结构情况,用适用的无损检测仪器检查是否存在超过规定要求的空腔、气泡、脱粘、弱胶层等缺陷,对于允许修复的缺陷应在修补后重新进行无损检验。

(2) 破坏性检验 从零件的不同区域切割条、带并剥开。仔细检查破坏试验区域上存在的空腔、胶接强度不足及其他不正常失效状态。证实胶层厚度符合相关技术文件的规定。

从事胶接生产人员要有一定的胶粘剂和胶接工艺基本知识，必要时还要对人员进行定期或不定期培训。

胶接过程中使用的材料可能易燃、有毒和有腐蚀性等，应采取相应措施避免对人员和环境造成损害。

6.4 胶粘剂和胶接性能测定

6.4.1 胶粘剂的物理化学性能测定

胶粘剂的物理化学性能决定胶粘剂的工艺性能，从工艺考虑需测定的主要性能有贮存期、适用期、粘度、固体含量和固化速度等，表 4-6-10 给出了测定上述性能的试验方法及标准。

表 4-6-10 胶粘剂物理化学性能试验方法标准

标准编号	标准名称	标准编号	标准名称
GB/T 2793—1995	胶粘剂不挥发物含量的测定	GB/T 7123.1—2002	胶粘剂适用期的测定
GB/T 13354—1992	液态胶粘剂密度的测定方法 重量杯法	GB/T 2794—1995	胶粘剂粘度的测定
GB/T 14518—1993	胶粘剂的 pH 值测定	GB/T 7123.2—2002	胶粘剂贮存期的测定方法

6.4.2 胶接力学性能检测

胶接力学性能检测包括静态性能、动态性能和环境老化后性能。静态性能包括抗剪强度、抗拉强度、不均匀扯离强度和剥离强度（包括 90°剥离、180°剥离和 T 形剥离等）；动态性能主要有冲击和疲劳性能；老化条件主要有湿热和盐雾等，老化后力学性能的测定按常规方法进行。部分胶接力学性能的试验方法和标准见表 4-6-11。

表 4-6-11 部分胶接力学性能的试验方法和标准

标准编号	标准名称
GB/T 7122—1996	高强度胶粘剂剥离强度的测定 浮辊法
GB/T 7124—2008	胶粘剂拉伸剪切强度测定(刚性材料对刚性材料)
GB/T 6329—1996	胶粘剂对接接头拉伸强度的测定
GB/T 2790—1995	胶粘剂 180°剥离强度试验方法挠性材料对刚性材料
GB/T 2791—1995	胶粘剂 T 剥离强度试验方法挠性材料对挠性材料
GB/T 7122—1996	高强度胶粘剂剥离强度的测定 浮辊法
GB/T 7749—1987	胶粘剂劈裂强度试验方法(金属对金属)
GB/T 6328—1999	胶粘剂剪切冲击强度试验方法
GB/T 7750—1987	胶粘剂拉伸剪切蠕变性能试验方法(金属对金属)
GB/T 11177—1989	无机胶粘剂套接压缩剪切强度试验方法
GB/T 13353—1992	胶粘剂耐化学试剂性能的测定方法 金属与金属
GJB 94—1986	胶粘剂-不均匀扯离强度试验方法(金属与金属)
GJB 444—1988	胶粘剂高温拉伸剪切强度试验方法(金属对金属)
GJB 445—1988	胶粘剂高温拉伸强度试验方法(金属对金属)
GJB 446—1988	胶粘剂 90°剥离强度试验方法(金属对金属)
GJB 447—1988	胶粘剂高温 90°剥离强度试验方法(金属与金属)
GJB 448—1988	胶粘剂低温 90°剥离强度试验方法(金属对金属)
GJB 1709—1993	胶粘剂低温拉伸剪切强度试验方法

目前尚无标准的胶接接头的疲劳试验方法,大多采用拉伸剪切疲劳试验,所用试样也与静态拉伸剪切试样相同,载荷常取静态强度的30%、50%、60%或70%,载荷系数取0.1,载荷相对误差在 $\pm 2\%$,试样试验时温度变化偏差应不超过 $\pm 1\%$ 。根据需要,试验可测定胶接接头的疲劳强度或疲劳寿命。

老化试验一般用来评定考核胶粘剂的耐环境性,湿热老化在各种调温、调湿试验箱中进行,温度可选择 $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、 $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$ 或 $(55 \pm 1)^\circ\text{C}$ 等;相对湿度大于等于95%。盐雾试验是评定胶接接头与海水及蒸汽接触的耐老化性能,试验在盐雾箱中进行,试验盐水配方为(重量比):氯化钠27,无水氯化镁6,无水氯化钙1,氯化钾1,蒸馏水67。经老化后的试样应在24h内测定各种性能。

6.4.3 无损检测

实际的胶接件一般不允许进行破坏试验,为了检测胶接质量的好坏,须对胶接件进行无损检测。无损检测的方法很多,但基本原理大致相同,即通过对比胶接完好部分和缺陷部分在物理性质上的差异来推断缺陷位置、形状、大小等,并寻求某一物理性质上的变化或缺陷程度与胶接强度间的关系以确定胶接质量。

无损检测常用的方法很多,主要有声学法、光学法和热学法。

1) 声学法应用最为普遍,种类也较多,包括敲击法、声撞法、声阻抗法、声谐振法、超声波法和声发射法。声学法中应用最多是声谐振法,此法的检测仪很多,典型的有福克(Forkker)胶接检测仪,这种仪器不但可以检测胶层内的裂纹、脱层等缺陷,而且可通过数据积累和分析,确定胶接强度。其次,超声波法也是较为普遍使用的有效的胶接无损检测方法,此法又可分为超声穿透法和超声波脉冲反射法两种。

2) 光学法主要包括目视检测法、射线法和全息照相干涉法。射线法是利用X射线和 γ 射线进行透视拍片的方法。通过胶层密度的变化判断胶接质量。

3) 热学法即利用热传导热扩散,根据热容量变化与胶层厚度和密度相关这一事实,通过对胶接件加热以检测其吸热或放热的温度变化来判断胶接质量。根据检测温度的方法不同,可以分为液晶法和红外线法等。热学法主要用来检测胶接件近表面的缺陷。

6.5 胶接应用

胶粘剂和胶接技术的应用已广泛应用于国民经济中的各个部门,成为工业生产中不可缺少的技术,在高技术领域中的应用也十分广泛,这里仅介绍胶接技术在建筑、汽车和航空等领域的典型应用。

6.5.1 胶接技术在土木工程行业的典型应用

(1) 建筑施工中各类混凝土预制构件的应用 如屋盖系统粘接、柱子接长、地基长桩接长、大梁接头粘接、抗震框架结构的隔断墙钢筋粘接、内外墙保温材料的铺装粘接、各类管道安装粘接、金属构件的粘接等。

(2) 室内外装饰、装修中的应用 近年胶接技术在此类应用中发展很快,如外墙锦砖粘贴、玻璃幕墙的安装、室内吊顶粘接、墙纸墙布的粘贴、地板装修、地砖粘接铺装、卫生间防水密封等。在装修中建筑胶粘剂应用非常广泛。

(3) 建筑物维修、改造、加固与补强应用 这方面应用近年发展很快,特别在改造与加固中,建筑结构应用已非常广泛,解决了许多传统工艺无法解决的难题。

(4) 各类交通设施与水利工程的加固和维修应用 近年来由于建筑胶粘剂的发展,特别是结构用胶新技术的发展(如碳纤维及其胶粘剂),在这方面已获得广泛应用,如公路桥梁的加固维修、公路隧道的加固维修、公路路面的铺设维修、机场跑道应急加固维修、铁路桥梁(钢筋混凝土)的加固维修、水利工程中的大坝堵漏加固维修、交通中特殊设施的加固维修等。

(5) 复合建材生产的应用 广泛应用于复合建材的生产质轻、强度高、功能多是复合建材发展的方向。在多种多样的此类建材中建筑胶粘剂是其生产过程中的不可缺少的粘接材料。

(6) 其他应用 建筑胶粘剂还可用于道路标志、水坝防漏、军事工程应急维修,以及堵漏等诸多方面。

6.5.2 胶接技术在汽车行业的典型应用

汽车(包括客货车、轿车、摩托车和其他交通工具)应用胶粘剂和胶接技术是为了简化工艺、提高效率、增加美观、提高性能等。胶接技术在汽车行业中主要用于金属、塑料、织物、玻璃、橡胶等本身或相互之间的结构连接、固定和密封。

汽车车身上应用的胶粘剂按照用途主要有折边胶、点焊密封胶、减振胶、焊缝密封胶、抗石击涂料、指压胶等,按承载大小又可分为结构型和非结构型。非结构型胶主要用于车身连接件表面的粘涂、密封,典型的非结构型胶包括表面粘接用胶粘剂、密封和导电胶粘剂等。结构型胶主要用于将结构单元用牢固地固定在一起,并传递结构应力,且在设计使用范围内保持其结构完整性和环境耐久性。

车身常用的连接方式通常采用点焊连接。一辆车车身上的点焊点大约有 3000 个左右,目前,采用点焊和粘接密封工艺的结合可以减少车身上的点焊点,在提高车身承受载荷能力的同时,还可以增加车身承受载荷的循环次数。近年来,以胶接替代点焊或部分替代点焊进行组装车身技术的发展,使胶粘剂在车身装配中又有了新的应用。例如,汽车的车门、发动机罩和行李箱盖等部件通常是将内、外盖板折边后点焊连接的,点焊产生的焊点在车身表面形成凹坑,对车身的外观质量产生了严重影响,为了解决这个问题,采用胶接取代点焊的方法来生产汽车车门、发动机罩和行李箱盖的折边结构,这种应用目前已非常普遍。

又如,在汽车车身制造过程中,车身覆盖件的外板与加强梁间的结合通常使用焊接方法装配,车门外板与加强梁、车身驾驶室顶盖加强梁、发动机罩加强梁以及行李箱盖加强梁等外板的组合,都采取焊接方法,由于在盖板与加强梁间存在着一定的缝隙,行车中可能因振动而产生噪声,而且盖板上的焊点也严重地破坏了外观的平整性,为了克服以上缺点,可在焊装前,将防振粘接剂涂在冲压薄板与加强梁结构中,经油漆烘干设备加热固化,胶层具有较高的粘接强度,受热膨胀后将加强梁与盖板紧密结合成为一体,减少或完全取消结合焊点,因而可以提高车身外表的美观性,减弱行车中的振动和噪声。

6.5.3 胶接技术在航空行业的典型应用

胶接结构可以实现大面积连接而减少(或取消)紧固件,具有比强度和比刚度高、结构重量轻、寿命长等一系列优点,已被广泛用于飞机结构,特别是次承力结构上。国外从 20 世纪 40 年代起开始飞机上应用金属胶接结构,至今胶接结构已成为飞机机体的重要结构形式,胶接技术已成为航空三大连接技术之一,并在其可靠性及耐久性方面取得了重要突破。

当前,几乎所有先进飞机的活动舵面(包括副翼、襟翼、方向舵、升降舵等)都采用了胶接蜂窝结构;运输机、客机、轰炸机等除广泛采用蜂窝胶接结构外,还大量采用了钣金壁板胶接结构和胶接—铆接、胶接一点焊、胶接—螺栓复合连接结构。机身上最大量的是机身蒙皮与钛合金止裂带的胶接,舱内地板的蒙皮蜂窝夹层结构胶接,出入门和飞机舱隔板的胶接,调整片、襟翼、扰流

板、尾翼和机翼的前缘板等部件的胶接, 发动机支柱和发动机的护罩消音板的胶接等。

荷兰的 FOKER 公司生产的 Foker-35 运输机, 其机身两侧的侧壁板采用了整体胶接结构。结构是由蒙皮、梁和环向肋整体胶接而成, 长度达十余米。整个结构没有使用一颗铆钉或螺钉, 减轻了结构重量, 提高了疲劳寿命, 提高装配效率。

在波音系列飞机中, 从波音 707 到最新的波音 787 的制造中, 都有上百平方米直到上千平方米的胶接面积, 其中波音 747 飞机的用胶量达到 1t, 表 4-6-12 列出了从波音 707 到波音 747 的用胶情况。

表 4-6-12 波音系列飞机结构胶接面积

机型	胶 接 形 式		机型	胶 接 形 式	
	蜂窝夹层胶接面积/m ²	金属板-板胶接面积/m ²		蜂窝夹层胶接面积/m ²	金属板-板胶接面积/m ²
波音 707	23.5	92.9	波音 737	92.9	298.7
波音 727	139.4	325.2	波音 747	334.4	924.3

以波音 737—300 为例, 全机金属胶接为 56 项, 共 217 件, 其中:

(1) 金属板—板胶接 151 件 胶接部位为机身蒙皮、垂直安定面、襟翼、梁、肋、腹板等。胶接形式主要为层板胶接, 其中, 机身蒙皮采取的是双层板胶接, 最大零件长为 4623mm, 组合直径为 1880mm; 垂直安定面前缘蒙皮胶接件尺寸达 5970mm×700mm。由于采用了耐久的铝合金磷酸阳极化处理胶接表面, 提高了铝合金蒙皮的耐疲劳性能和抗裂纹能力, 增加了构件的破损-安全性能。

(2) 胶接金属蜂窝夹层结构 66 件 用于外翼、翼根整流罩、襟翼、前缘缝翼、发动机舱整流罩、反推板等。发动机短舱整流罩上采用了胶接蜂窝消音结构, 整流罩和反推板蜂窝结构面板采用了胶接层板结构, 这都是为提高抗声振疲劳和破损-安全性能而进行的设计。

参 考 文 献

- [1] 王孟钟, 黄应昌. 胶粘剂应用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1987.
- [2] 李士学, 黄志启, 虞苏玮, 等. 胶粘剂制备及应用 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1984.
- [3] 王致禄, 陈道义. 聚合物胶粘剂 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1988.
- [4] 余云照. 2001 北京国际粘接技术研讨会论文集 [C]. 北京: 北京粘接协会, 2001.
- [5] 郭忠信. 铝合金结构胶接 [M]. 北京, 中国出版年鉴社, 1994.
- [6] 李金林, 余云照. 胶粘剂技术与应用手册 [M]. 北京: 宇航出版社, 1992.
- [7] 孙曼灵, 吴良义. 环氧树脂应用原理与技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [8] 李绍雄, 刘益军. 聚氨酯胶粘剂 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [9] 金士九, 金晟娟. 合成胶粘剂的性质和性能测试 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [10] 杨玉崑. 压敏胶粘剂 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [11] 范太炳. 特种胶粘剂 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [12] 卢凤才, 杨桂生. 耐高温胶粘剂 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [13] 龚克成. 高聚物胶粘基础 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1983.
- [14] 张在新. 《化工产品手册-胶粘剂》[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [15] 贺孝先, 晏成栋, 孙争光. 无机胶粘剂及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [16] 马长福. 实用粘接技术 460 问 [M]. 北京: 金盾出版社, 1992.

第 5 篇

焊接过程控制及 自动化基础

内容摘要：本篇主要介绍焊接过程中的自动控制方法、信号传感与检测、数字信号处理技术、焊接自动化专用设备和弧焊机器人。为了便于大家学习了解，首先介绍相关的基本概念、知识和主要的元器件，如单片微机、DSP、ARM 等数字处理芯片、PLC、传感器等的功能特点及其在焊接过程自动控制中的应用特点、工作原理。然后讲述焊接过程常用的较复杂的技术，如信号、视觉图像和焊接熔透质量的检测、处理、控制方法以及焊接设备的故障诊断技术。分析 PID、模糊逻辑、人工神经网络、小波变换、数学形态学等信号处理方法，在焊接过程自动控制中的应用原理。系统论述弧焊机器人技术的基本概念、知识、特点、分类及其在工业生产中的应用以及创新、发展的方向。

第 1 章 焊接过程自动控制技术

本章主要论述了单片机、DSP 和 ARM 等数字处理芯片，以及 PLC 在焊接过程自动控制中的应用特点和工作原理。针对焊接工艺动态过程的特点，分析了 PID、模糊逻辑和人工神经网络在焊接过程自动控制中的应用原理。

1.1 焊接过程自动控制系统概述

焊接作为一种先进的制造技术，它已从单一的加工工艺发展成为现代科技多学科互相交融的新学科，成为一种综合的工程技术。从万吨巨轮到不足 1g 的微电子元件，离开焊接技术根本无法制造。现代工业和科技的进步又大大促进了焊接自动化和高效化的发展，如计算机、自动控制、微电子和电力电子技术的新进展，都为焊接过程自动化提供了坚实的技术基础。

焊接技术已成为制造业中一种重要的共性关键工艺技术之一。焊接工作者在解决焊接工艺、材料、设备的同时，也在不懈地努力实现机械焊、半自动化焊、自动焊及具有自适应控制的机器人焊接，以替代手工焊。自动化焊接一般采用连续送丝的电弧焊方法，可以显著降低对焊工技术的依赖性，提高焊接设备的负载持续率，降低生产成本。自动焊具有以下优点：

- 1) 劳动生产率高，这是由于焊接设备负载持续率、熔敷速度及焊接速度均得到提高。
- 2) 焊缝质量高和稳定性好，焊出的焊缝质量均匀一致。
- 3) 焊接时间可预见性好，便于生产节拍安排，焊接成本严格可控。
- 4) 降低了对焊工的技术和培训要求。
- 5) 焊工可远离焊接区，劳动强度低，工作环境得以改善，安全性好。

自动焊系统包括以下装置：

- 1) 主控制器，用于控制焊接系统的所有操作和功能。
- 2) 焊接电弧，需要采用弧焊接电源、送丝机、焊炬及其他辅件。
- 3) 电弧行走装置，包括焊接专机、机器人等具有多轴多自由度系统。
- 4) 工件移动机构，包括变位机和转台等机构。
- 5) 工件夹具，可采用标准夹具或根据工件要求进行定制的非标夹具。
- 6) 焊接程序，根据焊接工艺要求编写程序并输入到主控制器中。
- 7) 焊接耗材。

目前弧焊逆变电源普遍采用 MOSFET（开关频率 100kHz 以上）和 IGBT（开关频率 20 ~ 30kHz）实现开关逆变控制，弧焊电源不仅体积小、重量轻、节能效果好，而且便于与其他设备结合实现自动控制。随着微电子技术的发展，单片机、DSP、ARM、PLC、CPLD/FPGA 等集成控制芯片的技术性能大幅度提高，为自动焊接技术提供了很好的硬件条件。在控制方法上，除了工业常用的 PID 及改进算法之外，人工神经网络、模糊逻辑控制、专家系统等智能控制方法也在焊接自动化过程中得到大量的成功应用。由于大量新技术和新的控制方法的出现，焊接过程与质量控制的自动化水平在近十多年中得到了迅猛发展。

1.2 焊接过程控制的微处理器应用

在焊接过程和质量控制中大量采用微处理器和数字集成芯片，在焊接单元设备中经常采用单片

机、DSP 和 ARM 微处理器芯片,以及 CPLD、FPGA 等数字逻辑芯片实现焊接过程和质量控制;而焊接自动生产线主要采用 PLC、工业控制计算机实现焊接工艺的程序控制。

1.2.1 单片机的应用原理及特点

单片机具有 3 个基本功能,即数值计算、数值分析和实时控制功能。采用单片机控制后,通过不同的控制算法可以获得弧焊电源的各种外特性;通过编程可实现任意复杂工艺的顺序控制;可以采用各种控制算法实现焊接参数的最优控制和匹配;利用现场通信技术可进行双机协同控制,实现双丝高速焊接;通过以太网 IP 接口技术可以实现焊接电源设备的远程管理、维护和升级。

1. 单片机的选型

自从 1975 年世界上第一台单片机诞生以来,已经发展了四代。按数据总线的位数来分,将单片机分为 4 位、8 位、16 位和 32 位机。20 世纪 70 年代后期,开始出现第一代 4 位单片机,它们是采用 NMOS 制造的,如 INTEL 公司的 MCS-48 系列。20 世纪 80 年代初期,第二代 8 位单片机,采用 CMOS 工艺制造,并逐渐被高速、低功耗的 HMOS 工艺代替,如 MCS-51,目前仍是市场的主流产品之一。第三代单片机出现了新特点:由可扩展总线型向纯单片型发展;多个 CPU 集成到一个 MCU 中;从并行总线发展出各种串行总线;工作电压降到 3.3V,功耗更低、可靠性更高。FLASH 的使用,标志着 MCU 技术进入了第四代。目前在单片机市场上,8 位单片机和 32 位的 ARM 嵌入式微处理器占据的市场份额达 70% 以上。

总体上看,美国著名公司的单片机技术仍处在领先的地位,特别是在高端产品方面,高性能的单片机新产品不断推出。而日本在单片机制造业方面也有相当的优势,也在积极争夺家电产品的大客户。韩国及我国台湾地区的一些公司在引进消化美国技术的基础上,以低价位的兼容产品占领市场。美国的 8 位单片机有 68HC05 和升级产品 68HC08,16 位机 68HC16,32 位单片机 683XX 系列;由于 Intel 公司在嵌入式应用方面将重点放在 186、386、奔腾等与 PC 类兼容的高档芯片的开发上,8051 类单片机主要由 Philips、三星、华邦等公司接产;Scenix 单片机在 I/O 模块的处理上引入了虚拟 I/O 的新概念;Zilog 面向低端应用的低价位 Z8 单片机;ATMEL 公司的 AVR 单片机;STC 的 8051 兼容的 STC89 单片机;日本 NEC 单片机 8 位 78K 系列单片机,NEC 着重于服务大客户;东芝的特点是从 4 位机到 64 位机门类齐全。

在焊接过程控制中最常采用 8 位单片机,一是其价格低廉,二是其性能可满足大多数焊接方法的控制需求。在单片机市场中,代表性的产品有 MCS-51 系列产品,其中 ATMEL 公司的 AT89C51/C52 两个系列 8 位单片机在焊接领域应用较为广泛。1994 年 ATMEL 公司以其 E²PROM 和 Intel 公司的 80C31 单片机核心技术进行交换,从而取得 80C31 核的使用权。AMTEL 公司把自己先进的 Flash 技术和 80C31 核相结合,从而生产出了 Flash 单片机。

MCS-51 单片机具有以下特点:集成了对事件控制专门优化过的 8 位 CPU,可方便地用于需要事件控制的场合;均具有布尔处理能力,使工业现场经常需要的位运算和操作变得非常简单;片上集成有多种外设,例如定时/计数器、串行口、可编程计数器阵列 (PCA) 等,为低成本、低芯片连线数设计提供了可能。MCS-51 有经典系列和扩展系列两大类,经典系列的主频为 12MHz 和 16MHz;扩展系列在代码和引脚上和经典系列完全兼容,主频为 24MHz 和 32MHz。在 MCS-51 系列的基础上又发展了 8XC51RA/RB/RC,与经典 MCS-51 相比,具有以下特点:片内又增加 256B 的 RAM,使片内 RAM 达到 512B;增加了硬件看门狗定时器,使硬件设计更加可靠、更符合规范。

PIC 单片机具有 RISC 的哈佛总线结构。数据线和指令线是完全分开的,程序和数据的存储可以采用不同的宽度,实现单字节指令,可以对程序和数据同时进行访问,其指令包含更多的处理信息,执行效率更高,速度也更快。与传统的采用 CISC 结构的 8 位单片机相比,可以达到 2:1 的代码压缩,速度提高 4 倍。该芯片采用二级流水线结构,实现了单周期指令,大大提高了程序的执行

能力。同时,该芯片还有保密性好、带看门狗定时器用来提高程序运行的可靠性、带有睡眠和低功耗模式的特点。

2. 单片机控制实现的功能

焊接过程采用单片机控制后,通过软件编程,大大丰富了控制系统的功能,增加了控制系统的灵活性和适应性,其主要功能如下:

(1) 外特性控制 通过不同的算法可获得恒流特性、恒压特性、不同的斜率外特性、组合的外特性和输出线能量的任意控制,以满足各种弧焊方法和应用场合的需要。

(2) 动特性控制 通过软件编程可以实现 PI 或 PID 调节器,在反馈量中加入电流变化率 (di/dt),可以控制电流的上升速度,使其符合焊接工艺的动态性能特征,使熔滴过渡稳定和减少飞溅。控制电流的变化率就相当于在电路回路里串联了一个可变的电抗器,也称为电子电抗器。软件编程更加灵活,不仅能改善系统的动态性能,还能减小弧焊电源体积和重量。

(3) 预置焊接参数 可以将焊丝材料与直径、工件材质与板厚、保护气体成分等预置在单片机系统的 ROM 存储器中。焊接时,操作人员可通过面板选择具体的焊接参数,单片机系统根据记忆再现,并在焊接过程中监控这些焊接参数。

(4) 实现“一元化”调节功能 针对某一焊接方法,在不同焊接规范下进行大量的焊接工艺试验,找出焊接参数之间的最佳匹配。在焊接时,仅用单旋钮选择焊接电流(送丝速度),其他焊接参数与之配合实现一元化调节,而不必逐个调节焊接参数。

(5) 对焊接电流波形的控制 通过软件编程实现 PID、模糊逻辑等控制算法,在焊接过程实时采集电流波形,可以实现 CO₂ 焊的 STT 波形控制,脉冲 MIG 焊的脉冲参数控制等。

(6) 对焊接工艺程序的控制和焊接故障报警 如对先通气后通电、引弧、电流的递增和衰减等工艺程序进行控制,以及对焊接过程中可能产生的粘丝、熄弧、过流、过压、过热、触嘴等故障进行诊断和报警。

3. 单片机控制的特点

焊接过程采用单片机控制后,性能更好,功能更全,与传统焊接过程控制相比,具有以下特点:

(1) 便于采用各种先进的控制算法 采用软件编程,不仅可以实现常规 PID 控制算法,而且可以实现自调整参数 PID、自适应控制等更加先进、更加智能化的控制算法,从而提高弧焊电源的控制精度和抗干扰的能力,智能化水平更高。

(2) 控制更加灵活、系统升级方便 采用单片机控制后,弧焊电源的许多控制功能可以通过软件编程实现,便于升级,只要修改软件,不必改硬件,大大缩短了设计开发周期,节约研发成本。

(3) 控制电路的元器件数量明显减少 随着单片机的集成度的不断提高,以前需要专用 IC 和分立元件实现的功能,可以在一块单片机内实现,有的甚至配有多通道 PWM、CAN 总线控制器,这样,只要很少的外围电路就能实现所需的各种控制功能。

(4) 控制系统的可靠性高且易于实现标准化 采用单片机后,许多模拟信号的处理被数字信号处理所代替,使控制系统的可靠性得到大大提高。对于某一系列的产品,可以采用同一套硬件控制电路板,而软件可以采用模块化设计,提高生产效率。在产品开发时,根据不同的焊接方法,修改有关参数,并将所需要的软件模块组合起来即可实现相应的焊接工艺。软硬件均可方便地实现标准化。

(5) 存储能力强且便于实现一机多用 多数单片机中集成了多种大容量的存储器,如 RAM、ROM、EEPROM、FLASH 等。在控制系统中就可以存放不同的焊接工艺应用程序及控制参数,这样就可以实现一机多用。

(6) 系统一致性好且便于生产制造 采用单片机实现信号的数字化处理, 不会出现模拟器件中因温飘和时飘等带来的差异问题, 使产品的一致性良好, 便于调试和生产制造。

4. 单片机控制的原理

焊接过程控制主要可分为以下几个模块: 焊接参数控制; 信号检测电路; 故障报警与处理电路; 人机界面; 通信电路。单片机在控制电路中处于核心地位, 是控制系统的中枢大脑, 它控制着几个模块按一定的规则协调有序地工作。

焊接过程单片机控制系统是由模拟量输入输出通道、数字开关量输入输出通道、键盘输入和数字显示输出通道、通信接口等组成, 各部分的功能如下:

- 1) 模拟量输入通道: 电弧电压、焊接电流、焊接速度等模拟量的实值检测。
- 2) 模拟量输出通道: 电弧电压、焊接电流、送丝速度、焊接速度及备用通道。
- 3) 开关量输入通道: 用于检测过流、过压、过热、缺相和风机停转等各种故障信号。
- 4) 开关量输出通道: 用于启动、应答、送气、送电、引弧、送丝及停止、故障报警等程序控制。

5) 通信接口: 与机器人、专机或 PC 微机进行通信的串行接口, 有 SPI、I²C 以及高速 CAN 总线通信。

6) 人机接口: 键盘显示、参数给定等。

如图 5-1-1 所示为采用 STC 公司 89C58RD+ 作为主控芯片进行焊接过程控制的系统结构图。这款单片机是 STC 推出的新一代超强抗干扰、高速、低功耗产品, 具有以下特点: 指令代码完全兼容传统 8051 单片机, 工作频率可达 50MHz 以上。配置包括 36 个 I/O 口, 32K 的 Flash 程序存储空间, 16K+ 的 E²PROM, 片上集成 1280 字节的 RAM, ISP 功能, UART, 8 路 A/D 通道, 看门狗, 内部集成 MAX810 专用复位电路等。

MCU 及外围电路包括供电设计、AD 芯片、DA 芯片、UART 串口设计, 以及气阀开关、送丝开关的设计。单片机控制过程如下: 由键盘直接输入焊接参数, 或借助于多圈电位器从基准电源产生电压信号, 并经过 A/D

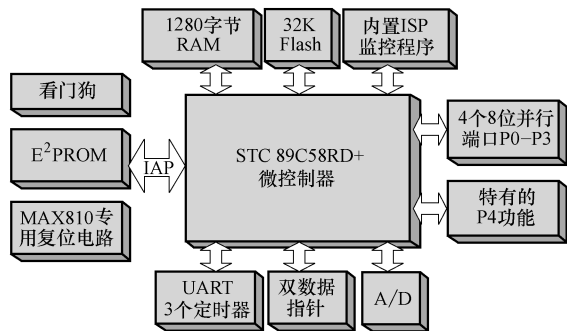


图 5-1-1 STC 89C58RD+ 结构图

转换输入焊接过程的焊接参数, 然后通过键盘或控制开关发出焊接指令。这时, 单片机接上弧焊逆变器、送丝机、保护气体等设备的有关控制通道, 并发出提前送气指令, 然后是引弧指令, 引弧成功后, 单片机自动把电流从小递增到预定值。若是 TIG 焊, 焊接电流通过电流反馈实现恒流特性控制。若是熔化极气体保护焊, 微机控制系统通过对电弧电压、焊接电流信号的采集比较, 使焊接速度和电弧电压调节到预定值。待工件预热 (工件厚度和电弧电压较大时才需预热) 到一定时间后, 单片机发出启动行走机构指令, 并输出一定数值的焊接速度信号, 开始正常焊接。在焊接过程中, 单片机实时数字显示焊接电流及电弧电压值 (包括空载电压), 自动进行焊接过程中的焊接参数变换。收弧时, 单片机发出收弧指令, 进行收弧处理 (包括电流衰减、滞后送气等)。收弧完毕, 单片机进入焊接结束状态, 并关闭所有通道。若在焊接过程中或焊接结束后检测到故障信号, 则以中断方式供单片机进行处理, 中断一切工作, 发出报警信息, 并显示故障原因, 以便操作者查找并排除故障, 待故障排除后方可再次进行焊接。

5. 单片机控制系统的实现

在单片机控制的弧焊电源中要执行多重控制任务, 如时序控制、波形控制、通信、键盘显示、

故障报警等，运算量较大，对实时性要求很高，因此对单片机控制系统有以下要求：

- 1) 单片机系统有较高的运算速度，由于系统运行的是实时多任务软件，要对焊接电流、电弧电压进行控制，需要实时采集电弧电压、电流信号，并对数据进行计算处理，发出相应的控制量。因此要综合考虑微处理器的指令处理速度、主频、A/D、D/A、片上存储器速度的适当匹配。
 - 2) 对于熔化极气体保护焊，送丝系统除保证其快速的动态响应性能以及送丝平稳等要求外，还要使其速度可调范围宽、结构简单可靠。
 - 3) 弧焊电源本身是一个强干扰源，加之焊接环境条件差，外界干扰源多，必须采取合理的抗干扰措施，才能保证控制系统的正常工作。
 - 4) 在设计单片机控制系统时，要综合考虑控制器的成本、性能价格比、体积等因素。
- 为了提高系统的可靠性，系统采用功能模块化设计、模块功能单一化等措施。弧焊电源单片机控制系统的硬件设计包括以下方面：

- 1) 单片机控制系统输入输出模拟量和开关量及其通道数量的确定。
- 2) 单片机控制系统的硬件结构。
- 3) 弧焊电源与微机的接口。

单片机系统控制的对象是弧焊电源及设备，为了确保安全可靠工作，实现高质量焊接，需要对输入输出模拟量和开关量及其通道数进行合理设计。

单片机控制的多功能数字化焊机主要由主电路、驱动电路和控制电路组成。主电路的主要功能是将电网的三相交流 380 V 整流后进行中频桥式逆变，再经二次整流后输出，输出电流可高达 500A。驱动电路主要功能是驱动逆变回路中的绝缘栅型大功率晶体管（IGBT），同时具有过热、过流等情况时封锁脉冲的保护功能。控制系统为焊机的核心部分之一，实现焊机工作的工艺时序和控制功能，如起弧、焊接、收弧、热起弧和短路控制等。

图 5-1-2 为单片机控制的弧焊电源硬件系统结构框图，包括由整流滤波电路、IGBT 全桥构成的逆变主电路、控制电路、送丝驱动、人机交互系统等部分。

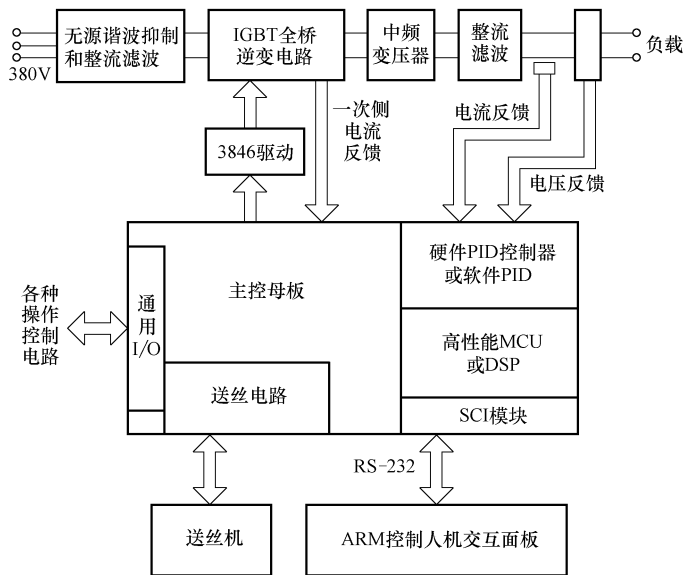


图 5-1-2 单片机控制的弧焊电源硬件系统结构框图

1.2.2 DSP 数字信号处理器的应用原理及特点

DSP 的主要特点是：哈佛结构，多总线结构，指令系统的流水线操作，专用的硬件乘法器，特

殊的 DSP 指令，快速的指令周期，硬件配置强。

通用 DSP 芯片的代表性产品包括 TI 公司的 TMS320 系列、AD 公司的 ADSP21xx 系列、MOTOROLA 公司的 DSP56xx 系列和 DSP96xx 系列、AT&T 公司的 DSP16/16A 和 DSP32/32C 等单片器件。

TI 的三大主力 DSP 产品系列为 C2000 系列主要用于数字控制系统；C5000（C54x、C55x）系列主要用于低功耗、便携的无线通信终端产品；C6000 系列主要用于高性能复杂的通信系统。C5000 系列中的 TMS320C54x 系列 DSP 芯片被广泛应用于通信和个人消费电子领域。

DSP 属于精简指令系统计算机（RISC），大多数指令都能在一个周期内完成，并可通过并行处理技术，在一个指令周期内完成多条指令；同时，DSP 采用改进的哈佛结构，具有分离的程序和数据总线，允许同时存储程序和数据；采用多级流水线和内置高速硬件乘法器，使其具有高速的数据运算能力。

DSP 以其强大的指令系统及接口功能显示出功能强、速度快、编程和开发方便等特点，广泛应用于通用数字信号处理、通信、语音处理、图像处理和仪器仪表及军事与尖端科技等方面，近年来 DSP 在自动控制领域也获得广泛应用。DSP 芯片已经成为数字电路设计的主要方法。

DSP 控制的弧焊电源借助 DSP 实现控制算法和 PWM 信号发生电路的全数字化，DSP 主要完成电压、电流信号的反馈运算、PWM 波形的输出、系统实时监控及保护、系统通信等功能。

1994 年，Fronius 公司的 Lahnsteiner. Robert 指出现代 GMAW 弧焊电源应满足多方面的不同需求，如适合于短路过渡焊接、脉冲焊接、射流过渡焊接和高熔敷率焊接等焊接工艺的合理的弧焊电源外特性可以通过一次侧工作于开关状态的弧焊逆变器实现；大量的焊接参数的设计必须实现 Synergic 控制（一元化控制）以使弧焊电源便于操作；为满足新的质量控制要求，弧焊电源必须实时记录焊接参数、识别偏差量等。

基于上述思想，伴随着新型的功能强大的数字信息处理器 DSP 的出现，Fronius 公司推出了全数字化弧焊电源，随后 Panasonic 等公司也推出了各自的全数字化弧焊电源产品，并相继进入中国市场。全数字化弧焊电源实现了柔性化控制和多功能集成，具有控制精度高、系统稳定性好、产品一致性好、功能升级方便等优点。如 Fronius 公司的 Transplus synergic 2700/4000/5000 系列产品在一台焊接上实现了 MIG/MAG、TIG 和焊条电弧焊等多种焊接方法，可存储近 80 个焊接程序，实时显示焊接参数，通过单旋钮给定焊接参数和电流波形参数，可以实现熔滴过渡和弧长变化的精确控制。同时，此类弧焊电源还可以通过网络进行工艺管理和控制软件升级。

图 5-1-3 所示为 DSP 控制的弧焊电源硬件系统结构框图，包括由整流滤波电路、IGBT 全桥构

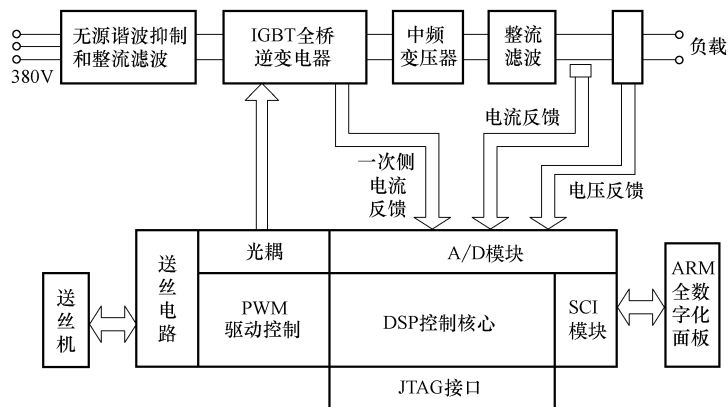


图 5-1-3 DSP 控制的弧焊电源硬件系统结构框图

成的逆变主电路、主变压器、整流滤波电路、基于 DSP 的控制系统、基于 ARM 的全数字化面板等部分。采用 TI 公司的专业级电源解决方案芯片——TMS320F2808 作为控制核心,通过软件实现软开关,输出的 PWM 由光耦隔离放大,驱动 IGBT 模块。反馈到控制板的信号包括初级电流(用于逐脉冲限流)、次级电流(用于恒流控制)、次级电压(用于恒压控制)。DSP 的 SCI 接口连接控制面板,实现全数字化调节。将一路 PWM 输出作为 DA,可以驱动送丝电路,调节送丝速度。此外,DSP 还需要工艺逻辑顺序控制、数据存储、专家系统生成和管理等功能。

DSP 控制的弧焊电源的特点是:采用强大的 DSP 控制核心(自带硬件乘法器),可以将所有模拟/数字信号接入 DSP 进行实时处理,简化了硬件设计,减少了硬件环节,提高了稳定性。软件实现 PID 控制,便于 PID 参数的修改和试验,也为模糊控制、自适应控制、甚至变 PID 参数控制提供了可能。另外恒流、恒压控制可以任意切换,可以探索和试验各种复杂的控制工艺。

就控制系统结构而言,全数字化弧焊电源的控制部分由单片机和 DSP 共同构成。单片机负责系统的总体管理及给定参数的输出,而弧焊逆变器的 PWM 信号产生和电流、电压的 PI 控制则由 DSP 完成。与传统的硬件电路构成的 PWM 信号发生器和 PI 控制器相比,基于软件方式实现的控制器具有更大的灵活性。

TI 公司最新推出的基于代码兼容的新型高性能 32 位定点数字信号处理器 TMS320F2808 作为主控芯片,实现了高性能 DSP 与闪存高精度 ADC 的完美结合,它主要有以下特点:

① 采用高性能的静态 CMOS 技术,最高工作主频 100MHz,指令周期为 10ns。

② 32 位高性能中央处理器,可以进行 16×16 位和 32×32 位的乘且累加操作。

③ 12 位 A/D 转换(共 16 通道),转换时间仅为 160ns,包括 2 个 8 通道的多路输入器,2 个采样保持电路,可单独或同时转换,具有快速转换速率,可选择内部触发或外部触发。

④ 容量为 $64K \times 16$ 位的 FLASH 程序存储器, $18K \times 16$ 位的单口 RAM (SARAM) 和 $1K \times 16$ 位的一次性可编程存储器,具有时钟和系统控制,支持锁相环(PLL)模块,看门狗定时器模块,2 个 32 位定时器,2 个 16 位定时器。

⑤ 35 个独立可编程或复用的通用输入/输出引脚(GPIO),多达 16 个 PWM 输出通道,其中包括 4 路 PWM 输出,3 个外部中断和外设中断扩展(PIE)模块(43 个外设中断),4 个串行外设(SPI)接口模块,2 个串行通信接口(SCI)接口模块,2 个控制器局域网络(CAN)模块。

⑥ 以 BGA 形式 $10mm \times 10mm$ 或 QFP 形式 $16mm \times 16mm$ 的微小尺寸封装,便于在微小型测试仪器中应用。

⑦ 采用 3.3V 外围接口电压和 1.8V 内核电压,支持 IDLESTANDBY 和 HALT 模式,先进的仿真功能,可通过开发环境实时调试,设置断点。

1. DSP 最小系统

一般情况下,DSP 内部内核和外部 I/O 模块采用独立供电结构,即 1.8V 内核电压和 3.3V 外围接口电压,如果在上电或掉电过程中两个电压供电起点和上升速度不同,就会在独立结构之间产生电流,进而影响系统的初始化状态。虽然 DSP 在上电过程中允许两种供电有一定的时间差,但为提高控制系统的稳定性和延长器件的使用寿命,设计和使用时必须考虑上电、掉电的次序问题。

DSP 最小系统电路即 DSP 能正常工作所必需的最小电路,主控芯片 TMS320F2808 的最小系统包括电源与复位电路、时钟振荡电路以及 JTAG 调试电路,DSP 最小系统控制电路原理图如图 5-1-4 所示。

在 DSP 引脚分配中,除去 VDD、AVDD 和信号地、电源地之外,还定义了 8 个 PWM 端口,8 路 A/D 输入端口、13 个 GPIO(含外部中断触发器)、1 个 SCI 串行口、1 个 SPI 接口、1 个 CAN 总线端口、1 个 JTAG 接口等。

2. 电源与复位电路

DSP 的供电是复杂的,既需要数字电源也需要模拟电源;对上电次序也有严格要求,要遵循

CPU 内核先于 I/O 上电, 且后于 I/O 掉电。TMS320F2808 上有 5 类电源引脚: CPU 内核电源引脚、I/O 电源引脚、PLL 电路电源引脚、Flash 编程电源引脚、模拟电路电源引脚。因此电源的合理设计对 DSP 的安全稳定运行具有十分重要的意义。

数字电源和模拟电源分开独立供电主要有以下两种方式:

- 1) 由数字电源产生模拟电源, 只要根据电流大小选择合适的电感或磁珠即可, 操作简单, 大多数场合已可以满足要求。
- 2) 数字和模拟部分独立供电, 数字电源和模拟电源之间没有任何联系, 完全单独供电。

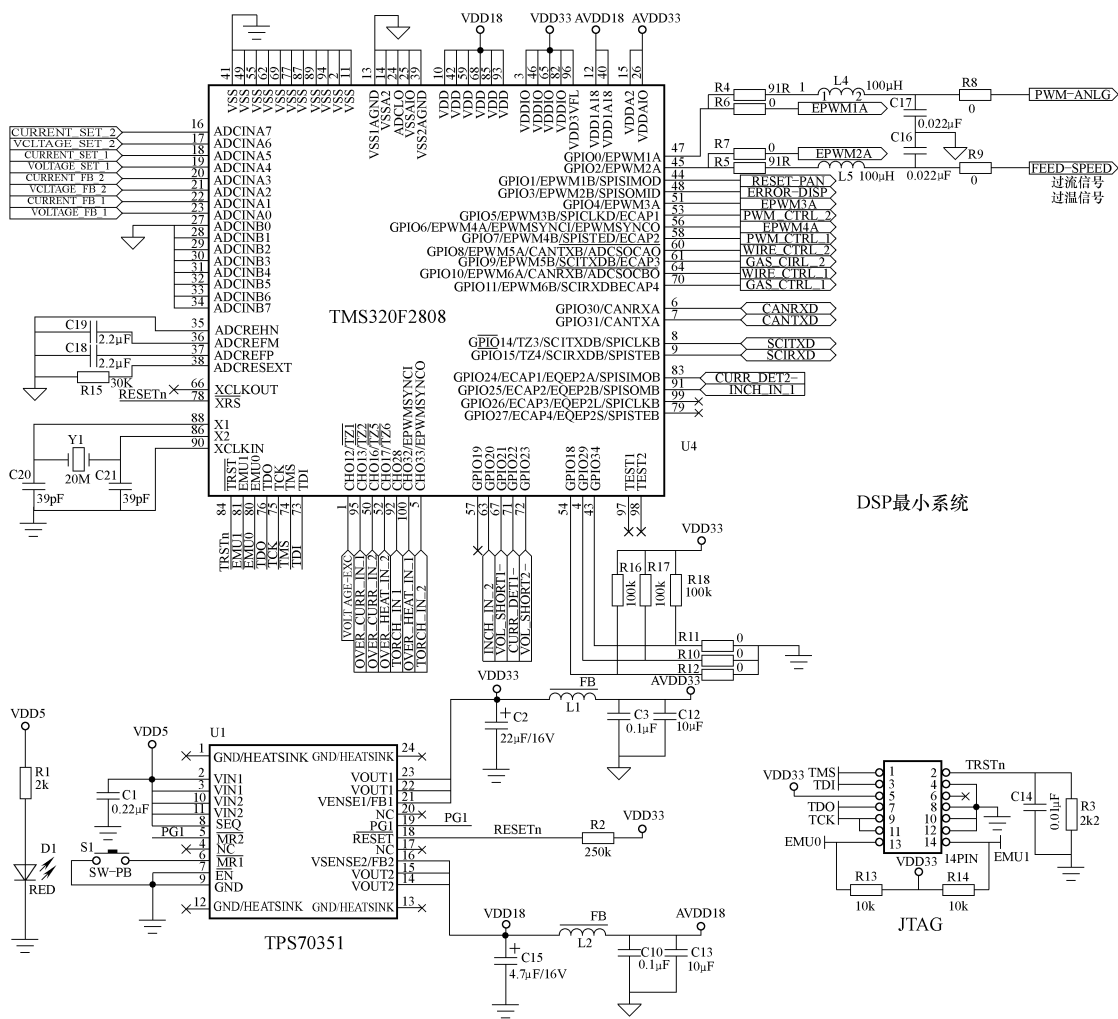


图 5-1-4 DSP 最小系统控制电路原理图

以第一种供电方式为例, 电源芯片采用的是 TI 公司专用的双电源器件芯片 TPS70351 实现 2808 的所有供电, 即由数字电源产生模拟电源。TPS70351 还可以实现上电复位, 是一款双路 LDO、内置上电次序控制、上电复位、500mA/3.3V 和 250mA/1.8V 的电源, 完全满足 TMS320F2808 的供电要求, 调试过程中发现具有良好的供电效果。TPS70351 电源芯片外围及复位电路原理图如图 5-1-5 所示。

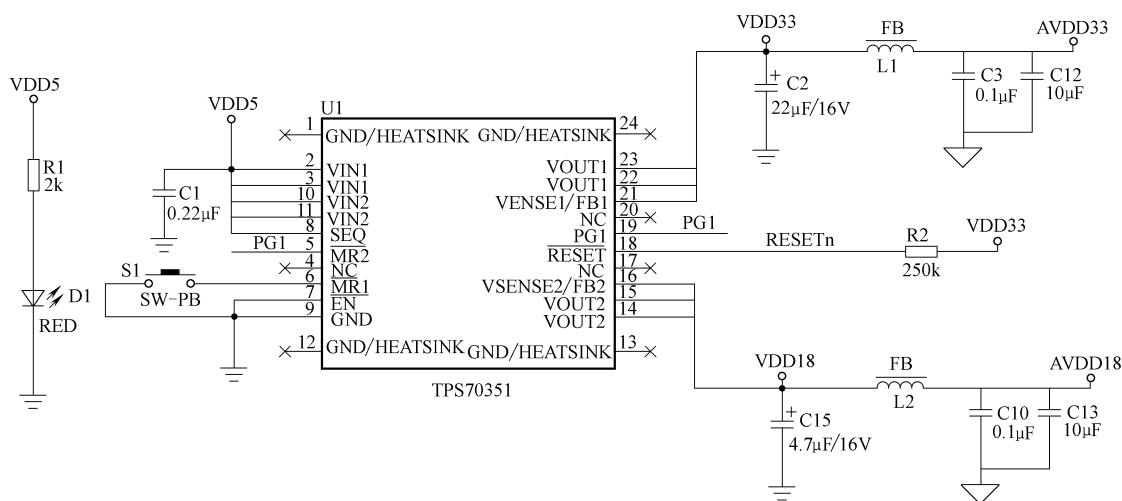


图 5-1-5 TPS70351 电源芯片外围及复位电路原理图

3. 锁相环时钟电路

由于主控芯片 TMS320F2808 最高时钟频率为 100MHz，可用倍频的方法来获得所需时钟频率。锁相环是一种反馈控制电路，简称锁相环（PLL: Phase-Locked Loops）。锁相环的特点是：利用外部输入的参考信号控制环路内部振荡信号的频率和相位，可以实现输出信号频率对输入信号频率的自动跟踪，因此锁相环通常用于闭环跟踪电路。TMS320F2808 内部具有 PLL 锁相环电路，用于对输入的时钟信号进行分频或倍频。使用 20MHz 的晶振，通过设置 2808 的 PLLCR 寄存器，就可以在程序里改变 PLL 的倍频数值，设定倍频系数为 5，即可获得 100MHz 的 CPU 时钟信号。

4. JTAG 调试接口电路

DSP 调试中需要用到 JTAG（Joint Text Action Group: 联合测试行动小组）接口来编写程序。JTAG 也是调试 DSP 程序的重要接口。JTAG 是 1985 年制定的检测 PCB 和 IC 芯片的一个标准，1990 年被修改后成为 IEEE 的标准，即 IEEE1149.1—1990，对 JTAG 接口芯片的硬件电路具有边界扫描和故障检测的作用。JTAG 接口调试电路如图 5-1-6 所示，TCK 为测试时钟输入；TDI 为测试数据输入；TDO 为测试数据输出；TMS 为测试模式选择，用来设置 JTAG 接口处于某种特定的测试模式；TRST 为测试复位输入引脚，低电平有效；GND 为地。

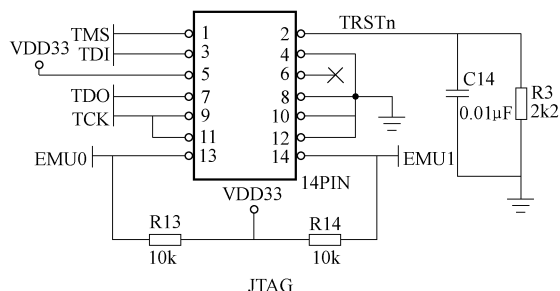


图 5-1-6 JTAG 接口调试电路

5. 采样反馈电路

图 5-1-7 所示为采样电压反馈电路，在电源的输出端对电压进行直接采样，经低通滤波滤除高频信号，通过合适的放大电路以及光耦隔离后，将采样的电压范围转换至 0~3V 之间，输入 DSP 的 A/D 口。

图 5-1-8 所示为采样电流反馈电路。在信号检测器件方面，采用 HALL 传感器是比较理想的选择，采用 LEM 公司的 BLF100—S7 电流霍尔传感器作为电流采样器件（实际电流为 500A 时，反馈电压为 5V），选择适当的元器件，当焊接电流变化范围为 0~500A 时，采样电压范围在 0~3V 之间，最大采样电压为 3V，滤波后输入 DSP 的 A/D 口。

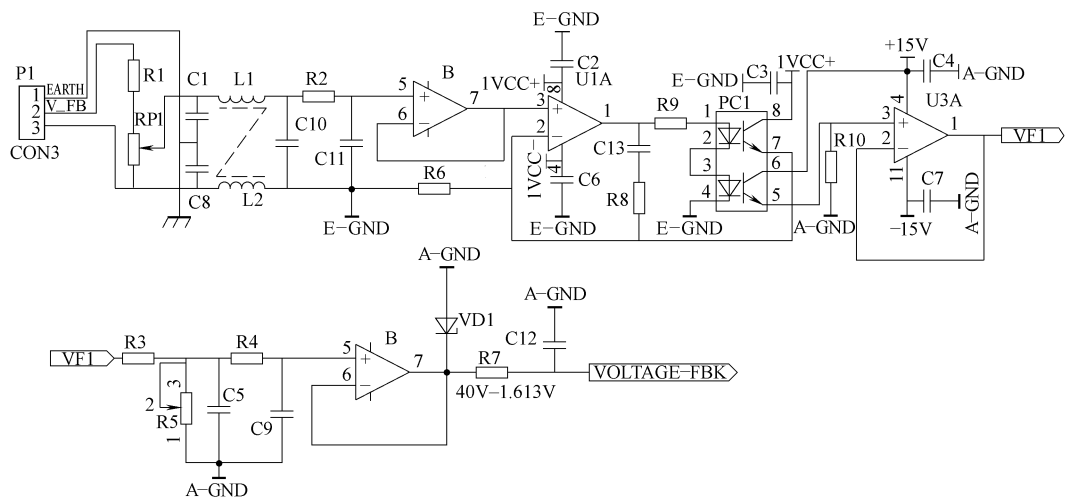


图 5-1-7 采样电压反馈电路

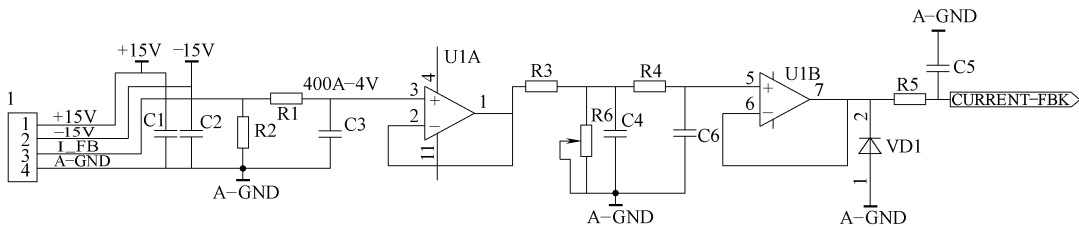


图 5-1-8 采样电流反馈电路

6. 送丝电路信号处理

送丝电路信号处理分为两部分，一部分为焊枪开关与点动开关信号电路，另一部分为给定电流与给定电压调制电路。焊枪开关与点动开关信号电路如图 5-1-9 所示，主要由窗口比较器组成，焊枪开关信号和点动送丝信号可以通过此电路很好地实现其功能。当焊枪开关与点动开关均无操作时，A 点的电位大于 10V，B 点和 C 点均为低电平；当按动点动送丝按钮时，A 点电位介于 5V 与 10V 之间，B 点为高电平，C 点为高电平；当按动焊枪开关，A 点电位低于 5V，B 点为高电平，C 点为低电平。

图 5-1-10 所示为焊接电流和焊接电压的信号调制解调电路。该电路由运放产生载波，当调节电压给定时，载波负半波发生变化，当调节电流给定时，载波的正半波发生相应的变化，再经过信号分离电路 1 和分离电路 2，解调为两个信号，送入 DSP。

7. 硬件保护电路设计

GMAW 电源一般都设计有过热、过流、欠压、过压及合闸保护，保证逆变电源安全工作。因为逆变焊接电源工作时产生大量热量会对主电路、控制电路及元件造

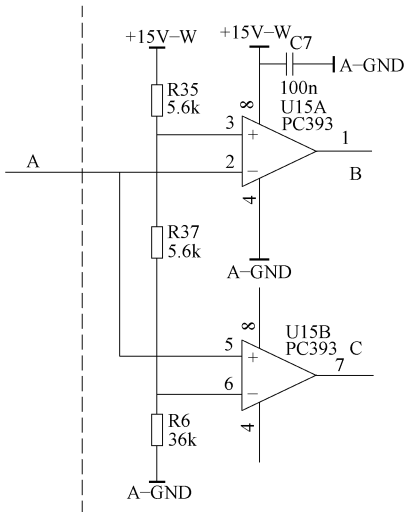


图 5-1-9 焊枪开关与点动开关信号电路

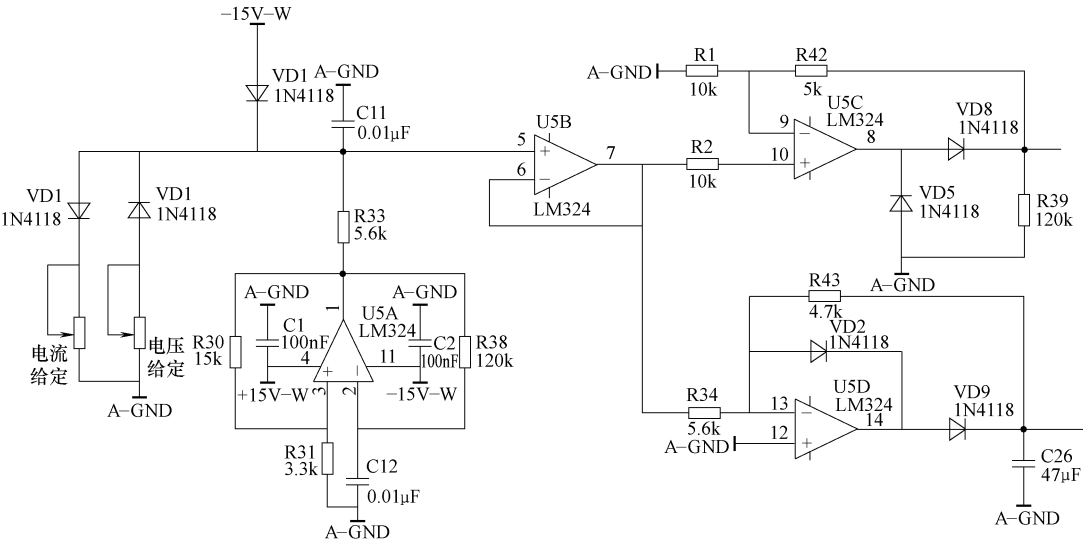


图 5-1-10 焊接电流和焊接电压的信号调制解调电路

成损害，还有大电流、高电压、较高的开关频率，而且焊接现场环境比较恶劣，这些都会对焊接电源造成损害。因此，硬件保护电路对主电路、控制电路进行保护，以防止过热、过流、过压、欠压等现象对电路造成损害。

在合闸保护方面，使用了三相 380V 交流接触器作为主电进入的开关，另外采取了两个措施，一是采取延时，保证主电路先导通，控制电路后导通，这样可以在通电瞬间，防止由于辅助电源初建、控制波形有误等原因导致误触发而损坏功率器件；另一个措施就是在初级直流母线侧采用 LC 滤波，串联一个大的滤波电感，一方面限制电流的增长速度，另一方面改善初级电流波形，减少高次谐波，提高功率因数。

8. 网压异常保护电路

在焊接过程中，电网电压的异常波动会影响焊接电源的工作性能，波动太大时还会对焊接电源造成严重的损害，必须对电网电压过压及欠压状态采取保护措施。如图 5-1-11 所示为网压异常保护电路。

三相交流电经变压器降压、整流成直流信号 V_{FB} ，所以 V_{FB} 与电网电压成正比。当电网电压正常时，两个比较器均输出高电平，光耦导通，欠压、过压信号为低电平；当电网电压异常时，即

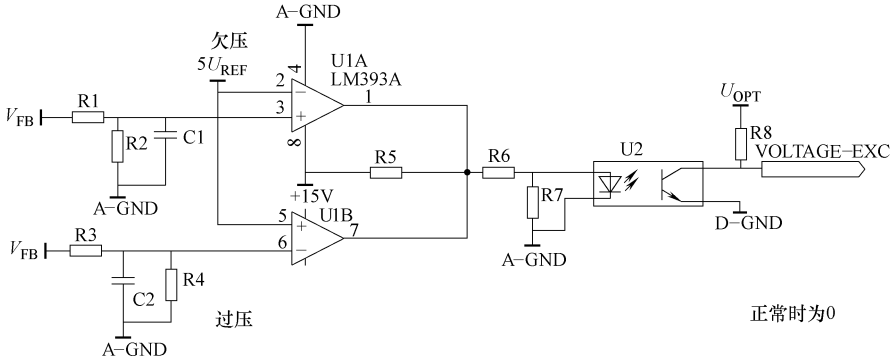


图 5-1-11 网压异常保护电路

V_{FB} 高于参考电压或者低于参考电压时, 比较器输出低电平, 两个比较器比较结果做“与”运算, 结果为低电平, 光耦不导通, 欠压、过压信号为高电平, DSP 关闭 PWM 输出, 并进行故障处理。可通过调节电阻大小, 改变电网欠压、过压的阈值电压, 即可起到网压异常的保护作用。

9. CAN 总线通信接口

CAN 总线是目前使用最广的现场总线, 用于电磁干扰较为严重的工业控制领域进行数据通信。图 5-1-12 所示为采用 TMS320F2808 的 CAN 总线外设所设计的 CAN 总线接口电路。CAN 总线通信需将 DSP 的 TTL 电平转换为总线的差分电平, 需要采用 SN65HVD230 作为电平转换装置。

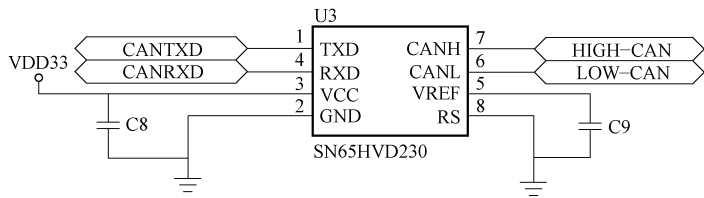


图 5-1-12 CAN 总线接口电路

10. 串口通信

串行通信因为传输距离远、接口设计简单、价格低廉等原因, 在工业上获得了广泛的应用。目前广泛使用的串行通信接口标准有 RS-232C 及 RS-422 和 RS-485。

可选择 RS-232 总线来实现 ARM 和 DSP 之间的数据交互。在具体应用上选择 MAX 232 芯片。RS-232C 既是协议标准又是电气标准, 它描述了在终端和通信设备之间信息交换的方式和功能, 是目前 PC 机与通信工业中应用最广泛的一种串行接口。RS-232 被定义为一种在低速率串行通信中增加通信距离的单端标准。它采取不平衡传输方式, 即所谓单端通信。DSP 与 MAX 232 的接口电路如图 5-1-13 所示。

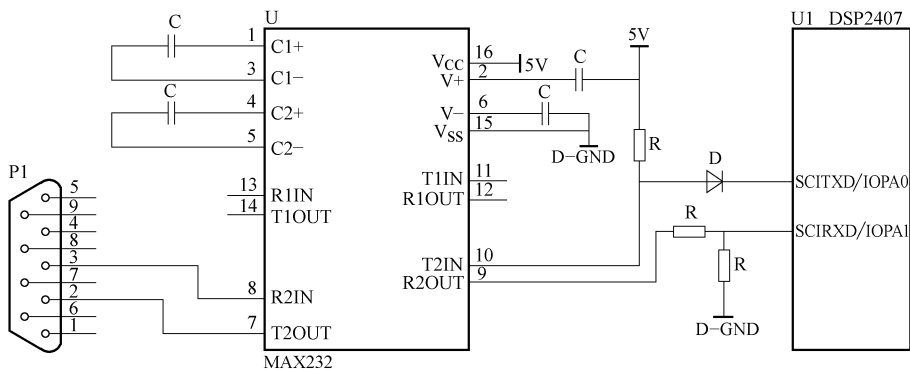


图 5-1-13 DSP 与 MAX 232 的接口电路

1.2.3 ARM 嵌入式系统的应用原理及特点

ARM (Advanced RISC Machines) 是通用的 32 位微处理器, 它是基于精简指令系统计算机 (RISC) 构建的。ARM 微处理器已经遍及工业控制、消费类电子通信系统、网络系统、无线系统各类产品市场, 基于 ARM 技术的微处理器应用占据了 32 位 RISC 微处理器 80% 以上的市场份额。采用 RISC 架构的 ARM 微处理器的主要特点包括以下方面:

- 1) 小体积、低功耗、低成本、高性能。
- 2) 支持双指令集, 能很好地兼容 8 位/16 位器件。
- 3) 大量使用寄存器, 指令执行速度更快。
- 4) 大多数数据操作都在寄存器中完成。

5) 寻址方式灵活简单, 执行效率高。

6) 指令长度固定。

在焊接生产过程管理信息化方面, 焊接工作者做了大量研究工作, 例如焊接工艺制定、焊材用量计算和统计、焊工技术档案管理、焊接工艺专家系统等, 但这些研究还主要集中在焊接生产的管理和决策层, 对焊接现场设备的网络化研究还十分薄弱。

ARM 嵌入式技术在联网方面的优势, 为弧焊电源实现网络化控制奠定了基础。若单片机控制的焊接设备具有网络功能则可以与企业现有的网络信息系统无缝连接, 实现焊接过程的网络化管理与监控, 这对于焊接质量控制和提高, 焊接制造过程的敏捷性具有重要意义, 并使焊机的远程故障诊断与维护成为可能。

ARM 处理器当前有 6 个系列产品, 分别为 ARM7、ARM9、ARM9E、ARM10E、ARM11 和 SecurCore, 每个系列包含不同类型的产品。ARM7 内核采用冯·诺伊曼体系结构, 数据和指令使用同一条总线, 内核有一条 3 级流水线, 执行 ARMv4 指令集。ARM7 的优点是耗电量少和成本低, 但 ARM7 的最大执行速率不到 100MHz, 在应用上它和 8051 之类的单片机类似, 但在功能上 ARM7 通常优于单片机。ARM9 采用 5 级流水线, ARM9 处理器能够运行在比 ARM7 更高的时钟频率上, 改善了处理器的整体性能; 存储器系统根据哈佛体系结构重新设计, 区分了数据总线和指令总线。ARM9E 是 ARM9 内核带有 E 扩展的一个可综合版本, 执行 v5TE 架构指令。ARM9 可以达到 180 ~ 200MHz 的工作速率, 它能驱动的周边装置比 ARM7 多, 应用范围也比较广。ARM10 的流水线扩展到 6 级, 支持可选的向量浮点单元 VFP; ARM10E 系列采用新的节能模式, 提供 64 位的 Load/Store 体系, 支持包括向量操作的满足 IEEE754 的浮点运算协处理器。ARM11 执行 ARMv6 架构指令, 它继承了一条具有独立的 Load/Store 和算术流水线的 8 级流水线。Cortex-M3 和 MPCore, Cortex-M3 主要针对微控制器市场, 而 MPCore 主要针对高端消费产品。Cortex-M3 改进了代码密度, 减少了中断延时并有更低的功耗。Cortex-M3 采用最新 Thumb-2 指令集。MPCore 提供了 Cache 一致性, 每个支持 1 ~ 4 个 ARM11 核。

在 ARM 嵌入式微处理器中, 典型的产品有: Philips 基于 ARM7 的 LPC21xx、LPC22xx, 基于 ARM9 的 LPC31xx, 这些芯片可用于工业过程控制。Samsung 公司生产的基于 ARM7 的 S3C44xx、S3C45xx 系列和基于 ARM9 系列的 S3C24xx, 它们是优秀的网络控制器。ATMEL 公司的 AT91AM9200 是基于 ARM9 的, 具有丰富的接口功能。

许多 ARM 芯片都具有网络控制功能, 从硬件的角度看, 以太网接口电路主要由 MAC 控制器和物理层接口 (Physical Layer, PHY) 两大部分构成, 目前常见的以太网接口芯片, 如 RTL8019、RTL8029、RTL8039、CS8900、DM9008 等, 其内部结构也主要包含这两部分。从网络化实现的技术可行性来看, 利用 ARM 嵌入式微处理器中的网络模块, 采用以太网网络通信技术, 在每台弧焊电源中内置 IP 地址, 这样弧焊电源就可以通过 RJ45 接口直接连接到企业的 Intranet 网中。

LM3S828 是 Luminary 公司 Stellaris (群星) 系列 ARM 中的一款, 它采用 ARM 公司专为 ARM 市场设计的最新内核 Cortex-M3, 最高主频可达 50MHz, 可以满足精细控制和高速运算的要求, 并在片上集成了大量外设, 是 SOC 级的 MCU。LM3S828 MCU 包括如下组成部分: 最高主频为 50MHz 的 Cortex-M3 内核; 64kB 单周期 FLASH 存储器和 8kB 单周期 SRAM 存储器; 每个 I/O 引脚都可以产生中断的 GPIO 模块; 多达 3 个通用定时器; 8 路 10Bit ADC 通道, 采样率高达 1 万次/s, 带片内温度传感功能; 1 路模拟比较器; 6 路电机控制 PWM 单元; 正交编码器接口 (QEI); 2 路完全可编程的 16C550 型 UART; 1 路同步串行接口 (SSI), 兼容 SPI 总线; 看门狗定时器。LM3S828 内部框图如图 5-1-14 所示。

ARM 芯片通信接口能力强, 一般用于焊接过程及设备人机界面系统的核心芯片。图 5-1-15 就是采用 ARM + CPLD 的设计方式来对数字化面板的输入输出设备进行控制。利用 ARM 的控制和运

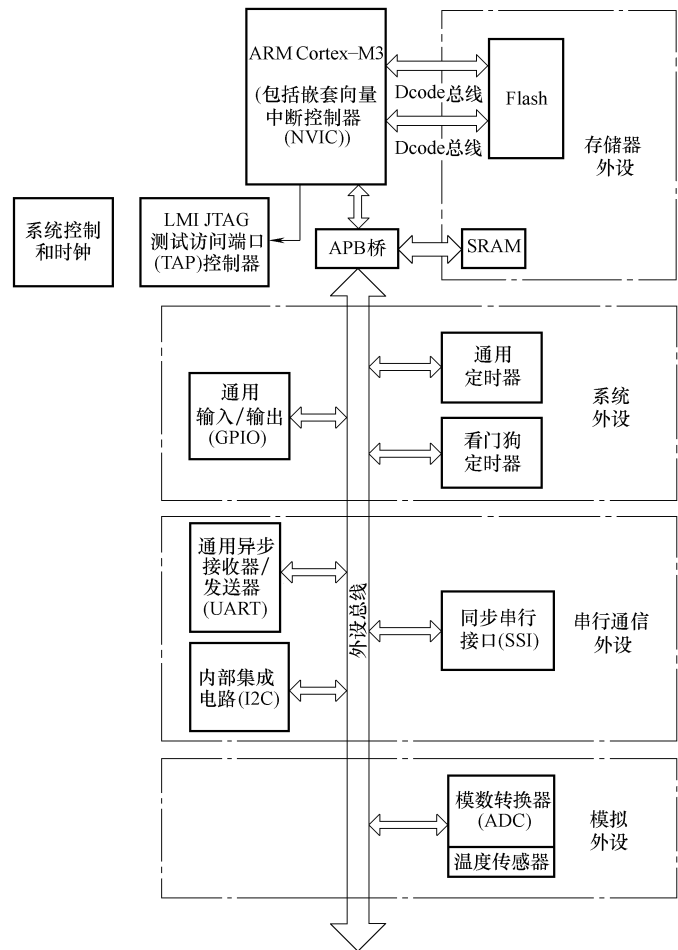


图 5-1-14 LM3S828 内部框图

算能力对面板的输入输出操作进行程序控制，产生相应控制命令，并将命令发送至 CPLD；同时利用 CPLD 丰富的 I/O 引脚和可灵活编程的特点，接收 ARM 发送的命令，并把命令转化为面板上数码管和相应 LED 的显示，显示焊接电源状态。

ARM 与 CPLD 之间采用 SPI 总线进行通信。数码管和 LED 连接到 CPLD 的 I/O 引脚，由

CPLD 进行控制，按键连接到 ARM 的 I/O 口，编码器则通过 CPLD 进行信号去毛刺处理后连接到 ARM 的正交编码器接口。这样的设计有如下优点：

- 1) 数码管译码和 LED 分组显示通过对 CPLD 编程来实现，大大减轻了 ARM 的负荷，使得 ARM 的工作效率更高。
- 2) 数码管和每个 LED 可由单独的 I/O 引脚控制，采用静态驱动，解决数码管和 LED 的频闪

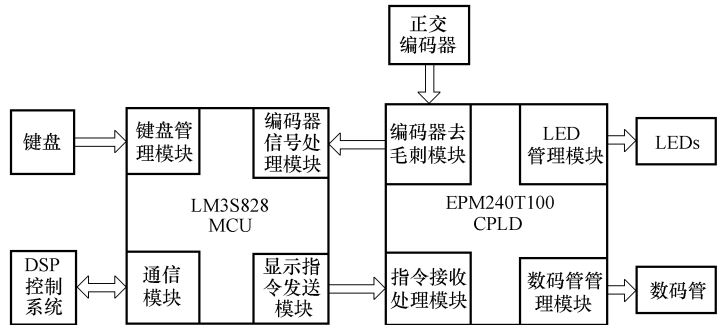


图 5-1-15 人机交互系统控制框图

问题。

3) 由于 CPLD 可以灵活编程, 因此硬件电路设计大大简化, 并可以方便地修改电路逻辑。

4) ARM 与 CPLD 之间的数据通信为单向通信, 即只有 ARM 向 CPLD 发送显示控制命令, 简化了 ARM 与 CPLD 之间的通信协议设计。

1.2.4 PLC 可程序逻辑控制器的应用原理及特点

1968 年美国通用汽车公司 (GM) 根据汽车制造生产线的需要, 希望采用电子化的新型控制器代替继电器控制柜, 以减少汽车改型时, 重新设计制造继电器控制盘的成本和时间, 通用汽车公司对新型控制器提出以下 10 条具体要求:

- 1) 编程简单, 可在现场修改程序。
- 2) 维护方便, 采用插件式结构。
- 3) 可靠性高于继电器控制柜。
- 4) 体积小于继电器控制柜。
- 5) 成本可与继电器控制柜竞争。
- 6) 数据可以直接输入管理计算机。
- 7) 可直接用 115V 交流输入。
- 8) 输出采用交流 115V, 能直接驱动电磁阀、交流接触器等。
- 9) 通用性强, 扩展时很方便。
- 10) 程序要能存储, 存储容量可扩展到 4K 字节。

针对通用汽车公司提出的 10 条要求, 美国数字设备公司 (DEC) 于 1969 年首先研制成功第一台型号为 PDP-14 的可编程控制器, 在美国通用汽车公司的汽车装配线上试用获得成功。1971 年日本从美国引进这项技术, 很快就研制出了日本第一台可程序控制器 DSC-8。1973 ~ 1974 年, 西德与法国也开始研制出自己的可程序控制器。

1. PLC 的硬件系统组成

PLC 的硬件系统都大体相同, 主要由中央处理器 (CPU)、存储器 (RAM、ROM)、输入输出模块 (I/O 接口)、电源及编程器几大部分组成。PLC 硬件结构框图如图 5-1-16 所示。

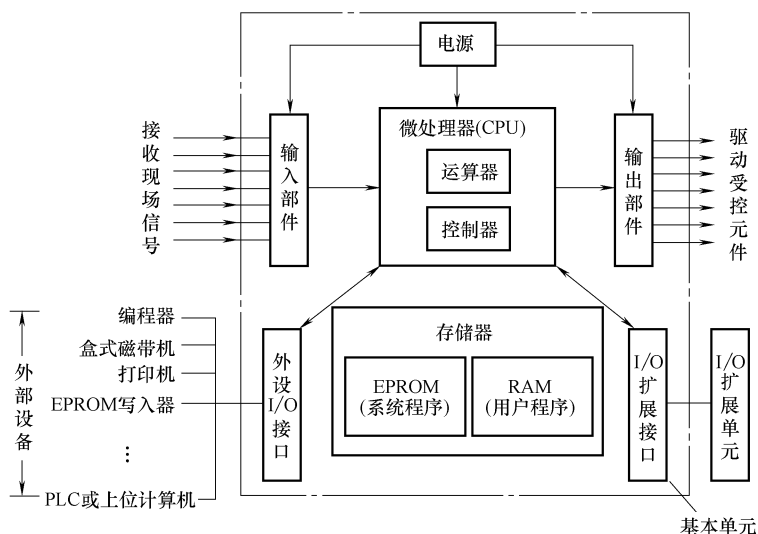


图 5-1-16 PLC 硬件结构框图

中央处理器（CPU）是 PLC 的核心部件，在 PLC 控制系统中的作用类似于人体的神经中枢，它在系统程序的控制下，完成逻辑运算、数学运算、协调系统内各部分工作等任务。它的主要功能有以下几点：

- 1) 接受并存储从编程器键入的用户程序和数据。
- 2) 用扫描的方式接受现场输入设备的状态或数据，并存入相应的数据区。
- 3) 监测和诊断电源、PLC 内部电路工作状态和用户程序编程过程中的语法错误。
- 4) PLC 进入运行状态后，从存储器中逐条读取用户程序，经过指令解释后，按指令规定的任务产生相应的控制信号，去启闭相关的控制电路。分时、分渠道地去执行数据的存取、传送、组合、比较和变换等动作，完成用户程序中规定的逻辑运算和算术运算等任务。
- 5) 根据数据处理的结果，刷新有关标志位的状态和输出状态寄存器表的内容，以实现输出控制、制表打印或数据通信等功能。

PLC 中采用的 CPU 一般有三类，第一类为通用微处理器，如 80286、80386 等。第二类为单片机芯片，如 8031、8051、8096 等。第三类为位处理器，如 AMD2900、AMD2903 等。

小型 PLC 大多采用 8 位微处理器或单片机，中型 PLC 大多采用 16 位微处理器或单片机，大型 PLC 大多采用高速位片式处理器。PLC 的档次越高，所用 CPU 的位数也越多，运算速度也越快，功能也越强。

PLC 配有两种存储器，分别为系统存储器和用户存储器。系统存储器存放系统程序，用户存储器用来存放用户编制的控制程序。常用的存储器类型有 CMOS RAM、EPROM、EEPROM。

输入模块和输出模块简称 I/O 模块，它们是联系外部现场设备和 CPU 模块的桥梁。输入模块用来接收和采集输入信号，开关量输入模块用来接收从按钮、选择开关、数字拨码开关、限位开关、接近开关、光电开关、压力继电器等来的开关量输入信号；模拟量输入模块用来接收电位器、测速发电机和各种变速器提供的连续变化的模拟量电流电压信号。输出模块用来送出 PLC 运算后得出的控制信息，并通过机外的执行机构完成工业现场的各类控制。开关量输出模块用来控制接触器、电磁阀、电磁铁、指示灯、数字显示装置和报警装置等输出设备；模拟量输出模块用来控制调节阀、变频器等执行装置。

PLC 配有开关式稳压电源，用来将外部供电电源转换成供 PLC 内部的 CPU、存储器和 I/O 接口等电路工作所需要的直流电源。PLC 一般使用 AC220V 或 DC24V 电源，内部的开关电源为各模块提供 DC5V、DC ± 12 和 DC24V 等电源。

编程器用来生成用户程序，并用它来进行编辑、检查、修改和监视用户程序的执行情况。一般分为手持式（简易）编程器和图形编程器两类。手持式编程器不能直接输入和编辑梯形图，只能输入和编辑指令表程序，因此又叫做指令编程器。它体积小、价格便宜，通常需联机工作，一般用来给小型 PLC 编程，或用于现场调试和维修。图形编程器既可用于指令语句进行编程，又可以用梯形图编程；既可联机编程又可脱机编程，操作方便、功能强，有液晶显示的便携式和阴极射线式两种。图形编程器还可以与打印机、绘图仪等设备连接，但价格相对较高。通常大中型 PLC 多采用图形编程器。

I/O 扩展单元用来扩展输入、输出点数。当用户所需的输入、输出点数超过主机的输入、输出点数时，就要通过 I/O 扩展单元来实现扩展。

PLC 还配设其他外部设备，如盒式磁带机、打印机、EPROM 写入器等。

2. PLC 的分类

按输入输出点数、功能和存储容量不同，PLC 可分为小型、中型和大型 3 类。

小型 PLC 又称为低档 PLC，这类 PLC 的规模较小，它输入输出点数一般从 20 点到 128 点，其中输入输出点数小于 64 点的 PLC 又称为超小型机。常见的小型 PLC 产品有三菱公司的 F₁、F₂、

FX₀ 系列, 欧姆龙 SP20 系列和西门子公司的 S5-100U、S5-95U、S7-200 等。

中型 PLC 的 I/O 点数通常在 120 到 512 之间, 用户程序存储器的容量为 2~8kB, 除具有小型机的功能外, 还具有较强的模拟量 I/O、数字计算、过程参数调节如比例、积分、微分 (PID) 调节、数据传输与比较、数制转换、中断控制、远程 I/O 及通信联网等功能。常见的有三菱公司 A_{1S} 系列, 立石公司 (欧姆龙) C200H、C500、西门子公司 S5-115U 等。

大型 PLC 又称高档 PLC, I/O 点数在 512 以上, 其中 I/O 点数大于 8192 点的又称超大型 PLC。大型 PLC 用户程序存储器的容量为 8kB 以上, 除具有中型机的功能外, 还具有较强的数据处理、模拟调节、特殊功能函数运算、监视、记录、打印等功能, 以及强大的通信联网、中断控制、智能控制和远程控制等功能。如三菱公司的 A_{3M}、A_{3N}, 立石公司的 C100H、C200H, AB 公司的 PLC-5 以及西门子公司 S5-135U、S5-155U、S7-400 等。

3. 梯形图编程语言

梯形图编程语言 (Ladder Diagram) 与传统继电器控制电路图相似; 梯形图与继电器控制图设计思路也基本一致; 梯形图很容易由电气控制电路转化而来。由于梯形图是 PLC 用户程序的一种图形表达形式, 因此梯形图设计又称为 PLC 程序设计或编程。继电器电路图与梯形图的比较如图 5-1-17 所示。

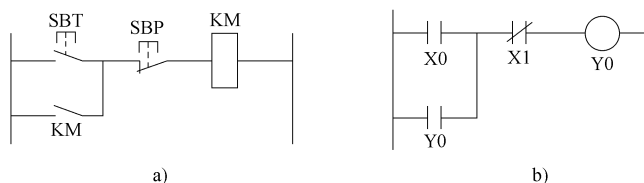


图 5-1-17 继电器电路图与梯形图的比较

a) 电路图 b) 梯形图

通过图 5-1-17 可以看出两者的区别在于继电器控制图使用的是硬件继电器和定时器, 靠导线连接组成控制电路, 而 PLC 梯形图使用的是内部继电器、计时器和计数器, 靠软件来实现控制。因此, PLC 的使用具有很高的灵活性, 程序修改过程非常方便。

4. PLC 在焊接自动化中的应用

在焊接过程自动化控制中包括焊接工艺的程序自动控制和焊接过程参数的自动控制, PLC 主要用于焊接过程的程序自动控制, 当然也可用于某些焊接过程的参数调节。对于电弧焊的程序自动控制, 主要包括弧接电源、送丝机、焊接小车或焊接转台、工装夹具按照特定的顺序运行、停止。为了保证自动电弧焊的顺利实施, 不同的焊接方法有不同的程序控制要求。气体保护焊进行自动焊应满足以下要求: 提前和滞后送气; 可靠的一次引燃电弧; 熄弧控制; 焊接过程的程序控制。PLC 配合焊接专机可以用于环形焊缝的自动焊接, 变压器铁心的四面焊缝自动焊接, 多工位焊缝的自动焊接等。

1.2.5 PC 计算机的应用原理及特点

1. 计算机仿真技术

计算机模拟技术在焊接中的应用, 是通过软件在计算机中模拟一个物理过程, 例如焊接热过程、力学过程、熔池的形成过程、焊缝金属的结晶过程及接头组织性能预测、焊接裂纹的形成过程、焊接接头的力学行为、计算焊接力学、焊接电弧的热-力学行为、电源-电弧系统的稳定性、焊机控制系统的结构及静态和动态过程、焊工操作技术等。进行计算机模拟的关键是对所研究的系统建立一个能进行分析的数学模型或软件模型。由于目前计算机应用数学技术、软件技术的发展, 利用计算机不仅能计算解析数学模型, 还能计算统计模型、随机过程、甚至各种逻辑推理模型。并且由于计算机图形技术的发展, 可以用各种二维或三维图形来表述分析或模拟的结果, 有助于人们对事物发生变化的过程与结果进行深入的分析。计算机模拟技术已在焊接领域中的应用包括: 焊接热过程模拟, 焊接熔池中流体动力学的模拟, 焊接冶金过程的模拟, 焊接热应力、残余应力和变

形的模拟。

2. 计算机网络控制技术

由单台 PC 机组成的控制系统只能控制局部、小范围内的生产过程与设备，如要控制一个车间，乃至一个大中型企业的生产和设备，必然要使用网络技术。将多台 PC 机连接，可以实现此任务。在现代化企业中，计算机已经在自动控制、办公自动化、经营管理、市场销售等方面起重要作用。企业网络将成为连接企业内部各车间、部门和与外部交流信息的重要集成设施，在市场经济与信息社会中，企业网络对企业的综合竞争能力具有重要作用。因此了解计算机在焊接中的应用，不可不了解目前计算机在企业中应用的全貌，并研究如何将计算机对焊接过程的控制，焊工档案的管理，焊接工艺卡的制定等应用技术集成于整个企业信息管理网络中。

具有分散控制、信息集中管理特点的分布式计算机控制系统称为集散控制系统（DCS 系统）。现代工业对控制系统的要求已不局限于自动数据采集和控制功能，还要求工业过程能长期在最佳状态下运行。对于一个规模庞大、结构复杂、功能综合、因素众多的大型控制系统，要求不是一个局部最优化问题，而是一个整体的总目标函数最优化问题。总目标函数不但包括产品质量和产量等指标，还包括成本、污染、环境控制的各方面的要求，但对于一个复杂的大系统，直接进行多目标最优化控制是很困难的，实际上也无法实现这样的目标。集散型控制系统（DCS 系统）的结构通常分三级：第一级为直接过程控制级，第二级为集中操作监视级，第三级为综合信息管理级。各级之间由通信网络相连，级内各站或单元由本级的通信网络进行通信联系。

典型 DCS 系统结构图如图 5-1-18 所示。

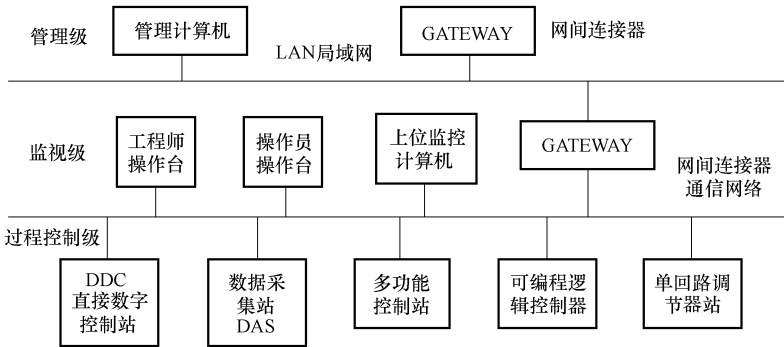


图 5-1-18 典型 DCS 系统结构图

（1）过程控制级 这一级直接面向焊接或其他生产过程，是分散控制系统的基础，它直接完成面向传感器的生产过程的数据采集（如电弧电压、焊接电流、焊接速度、温度、压力、气体和液体流量、产品数量等模拟量和数字量或开关量）、调节控制（对所采集的数据和状态信息进行处理，判断生产是否正常，对生产中的参数，如当焊接参数或设备运行参数超限时进行报警或直接进行调节等），以及实行闭环和开环控制，包括直接数字控制（Direct Digital Control）和顺序控制（Sequential Control）等功能。

（2）集中操作监视级和监控级 监视级以操作监视为主要内容，兼有部分管理功能，是面向系统操作员和控制系统工程师的，因此需要配置功能强、外设全的计算机系统，如大屏幕显示器、大容量存储器 and 相应的软件，确保系统工程师和操作员能对系统进行组态、监视和有效的干预，保证生产过程正常运行。

监控级的主要任务是实现过程控制级的协调和优化控制，包括优化控制功能和自适应控制。优化控制功能是根据某一目标函数和生产过程模型，用数学进行优化运算，得出一些优化控制条件，

传送给过程控制级作为控制的依据。自适应控制是根据估计的模型及参数,自适应地计算优化控制条件,将条件传给控制级作为控制的依据。这一级的管理功能包括对厂内生产、原材料、能耗进行优化管理,协调各部分的工作。

(3) 综合信息管理级 这一级由高档微机或小型机的工厂自动化综合服务系统和办公自动化系统组合而成,负责有关的经济、工程、生产方面的综合处理,达到优化组合的目的。

1.2.6 其他数字处理器控制技术

在焊接过程控制中,除了常用的 MCU、DSP 和 ARM 等控制处理芯片外,还经常用 GAL、CPLD 和 FPGA 等大规模或超大规模数字逻辑芯片,以便扩展上述控制处理芯片的数字逻辑控制功能和 I/O 接口能力。

FPGA (Field Programmable Gate Array) 是 Xilinx 公司发明的,它也是 FPGA 的主要生产厂家;CPLD 的主要生产厂家有 Altera、Lattice、ACTEL、Cypress、Atemal、Luccent。

1. GAL 逻辑控制接口

DSP 运行当中需要和许多外设进行数据交换,如 D/A 芯片、外扩 RAM 等,同时也需要接收一些重要的开关量信号,如复位信号。在一个指令周期当中,DSP 与外设之间的数据总线和地址总线只能有一个用途,因此,必须设计一个合适的逻辑,合理地组织各个外设和信号,使他们之间运行不会产生冲突。可以采用 GAL16V8-15LJ 为逻辑控制芯片来扩展 DSP 的逻辑控制能力。GAL16V8 是一款通用逻辑矩阵芯片,也是在译码方面常用的芯片,它具有以下主要优点:

- 1) 价格低廉。
- 2) 编程方便,可使用多种工具进行编程,程序语言和 C 语言类似,简单快捷。
- 3) 具有其他芯片所不具有的高速度,最快速度可达 3ns。
- 4) I/O 多,适合逻辑比较复杂的场合。

GAL16V8-15LJ 的输入到输出转换时间为 15ns,DSP 的时钟周期为 33ns,故能够满足 DSP 的需要。GAL16V8 的编程工具主要有 ABEL 语言,CUPL 语言,以及 lattice 的 ispEXPERT 等。CUPL 是一种类似于 ABEL 语言的语言,它可以直接在 windows 环境下编写。

CUPL 语言主要由以下 5 部分组成:

- 1) 程序基本情况:包括程序名、日期、单位和器件型号等。
- 2) 输入引脚定义:定义各个输入引脚的名字。
- 3) 输出引脚定义:定义各个输出引脚的名字。
- 4) 变量申明:所有中间变量和普通变量在这里申明。
- 5) 等效逻辑:程序的核心部分,也是逻辑表达的地方。

2. CPLD 逻辑控制接口

在焊接过程控制中,对于数字化的面板可由 ARM + CPLD 来扩展 I/O 接口,实现按键和参数指示灯等开关量的控制。通常可选用 Altera 公司的 EPM240T100 CPLD,它是 ALTERA 公司 MAX II 系列 CPLD 中的一款。Altera 的 MAX II 系列 CPLD 是有史以来功耗最低、成本最低的 CPLD。MAX II CPLD 基于突破性的体系结构,在所有 CPLD 系列中,其单位 I/O 引脚的功耗和成本都是最低的。MAX II CPLD 还进一步提高了高密度产品的功耗和成本优势,这样,可以使用 MAX II CPLD 来替代高功耗和高成本 ASSP 以及标准逻辑 CPLD。MAX II CPLD 系列器件具有如下特性。

1) 低功耗,最低 1.8V 内核电压降低了功耗,提高可靠性,具有自动启动/停止功能,CPLD 不使用时关断,大大延长了电池供电时间。低成本体系结构,通过设计,减小了管芯面积,单位 I/O 引脚成本在业界是最低的。高性能,支持高达 300MHz 的内部时钟频率。板上振荡器和用户闪存,不需要分立振荡器或者非易失存储器,减少了芯片数量。实时的系统可编程能力 (ISP),器

件工作时,可下载新的程序,降低了远程现场更新的成本。

2) 灵活的 MultiVolt 内核:片内电压稳压器支持 3.3V、2.5V 和 1.8V 供电,减少了电源数量,简化了电路板设计。I/O 能力:MultiVolt I/O 支持和 1.5V、1.8V、2.5V 以及 3.3V 逻辑电平器件的接口。MAX II 系列 CPLD 器件常见的应用包括:上电排序、系统配置、I/O 扩展、接口桥接等。

3) MAX II CPLD 可以在 Altera 公司的 Quartus II v7.0 集成开发环境中进行开发。Quartus II 是 Altera 公司的综合性 PLD 开发软件,支持原理图、VHDL、VerilogHDL 以及 AHDL (Altera Hardware Description Language) 等多种设计输入形式,内嵌综合器以及仿真器,可以完成从设计输入到硬件配置的完整 PLD 设计流程。

4) Quartus II 可以在 XP、Linux 以及 Unix 上使用,除了可以使用 Tcl 脚本完成设计流程外,提供了完善的用户图形界面设计方式。具有运行速度快、界面统一、功能集中、易学易用等特点。Quartus II 支持 Altera 的 IP 核,包含了 LPM/MegaFunction 宏功能模块库,使用户可以充分利用成熟的模块,简化了设计的复杂性、加快了设计速度。对第三方 EDA 工具的良好支持也使用户可以在设计流程的各个阶段使用熟悉的第三方 EDA 工具。此外,Quartus II 通过和 DSP Builder 工具与 Matlab/Simulink 相结合,可以方便地实现各种 DSP 应用系统;支持 Altera 的片上可编程系统 (SOPC) 开发,集系统级设计、嵌入式软件开发、可编程逻辑设计于一体,是一种综合性的开发平台。

3. FPGA 逻辑控制接口

CPLD/FPGA 是一种半定制的 ASIC,属于 LSI 或 VLSI 逻辑器件,其主要特性如下:

- 1) 采用 LSI/VLSI 技术制造,高集成度(最高已达到千万门级)。
- 2) 支持各种组合逻辑和时序逻辑电路设计,甚至实现“片上系统”(SOC)。
- 3) 可编程改变芯片的逻辑功能,芯片可重复使用,具有 ISP (In System Programming) 或 ICR (In Circuit Reconfigurable) 特性。
- 4) 具有很高的逻辑无限能力,可预测信号延迟,便于用计算机进行逻辑功能、时序仿真。
- 5) 有良好的设计加密功能,便于保护知识产权 (IP)。
- 6) 有强大的 EDA 开发工具(软件)支持,与 ASIC 设计相比,易学易用。
- 7) 研制、开发时间短,费用相对少。
- 8) 必须借助 CPLD 开发系统,才能设计、开发 CPLD、FPGA 系统。

FPGA 即现场可编程门阵列,它是在 PAL、GAL、EPLD 等可编程器件的基础上进一步发展的产物。FPGA 是作为专用集成电路 (ASIC) 领域中的一种半定制电路而出现的,既解决了定制电路的不足,又克服了原有可编程器件门电路数有限的缺点。

FPGA 采用了逻辑单元阵列 LCA (Logic Cell Array) 的新概念,内部包括可配置逻辑模块 CLB (Configurable Logic Block)、输出输入模块 IOB (Input Output Block) 和内部连线 (Interconnect) 三个部分。FPGA 的基本特点主要有以下方面:

- 1) 采用 FPGA 设计 ASIC 电路,用户不需要投片生产,就能得到合用的芯片。
- 2) FPGA 可做其他全定制或半定制 ASIC 电路的中试样片。
- 3) FPGA 内部有丰富的触发器和 I/O 引脚。
- 4) FPGA 是 ASIC 电路中设计周期最短、开发费用最低、风险最小的器件之一。
- 5) FPGA 采用高速 CHMOS 工艺,功耗低,可以与 CMOS、TTL 电平兼容。

可以说,FPGA 芯片是小批量系统提高系统集成度、可靠性的最佳选择之一。目前 FPGA 的品种很多,有 XILINX 的 XC 系列、TI 公司的 TPC 系列、ALTERA 公司的 FIEX 系列等。

1.3 焊接过程控制系统的可靠性与电磁兼容技术

计算机数据采集与控制系统在焊接中应用时,系统的可靠性是十分重要的。提高计算机控制系统的可靠性有两个方面的问题。一个是系统硬件本身工作的可靠性;另一个是是否可靠地抑制干扰。

解决第一个问题的办法是系统选用的元器件及电路板的制作要可靠,而且工作寿命长,或者采用容错设计(或称容忍故障的设计),即用各种冗余技术将不大可靠的元器件组成可靠性较高冗余系统。冗余(redundancy)的意思是多余,所以冗余技术就是采用适量多余器件的办法,即适当增加硬件投资的办法来换取系统的高可靠性。根据皮尔斯(Pierce)的观点:在一定条件下,冗余的成本线性增加,可使系统的故障率按对数规律下降。

解决第二个问题办法就是采用有效删除抑制各种噪声干扰的技术。这是十分重要的问题,因为在焊接现场,噪声干扰的环境十分恶劣,抗干扰问题如不能得到很好的解决,计算机系统将无法正常工作,严重时将破坏系统的硬件。本节主要介绍计算机控制系统在焊接中应用时,噪声的来源及其抑制技术。

1.3.1 电磁兼容问题

随着电子电器设备的广泛使用,电磁干扰对环境的影响日益严重,以致实际应用中的各类电器的电磁干扰和相互不兼容时有发生。工业、科学、医疗、信息、机动车辆、电力设备和电气化铁道等电工电子设备产生的电磁干扰不仅会扰乱公共安全和通信设备的正常工作,而且对于居民日常生活甚至人身安全都会造成影响和危害。

电磁兼容性(EMC—Electromagnetic compatibility)是指在同一电磁环境中,设备能够不因为其他设备的干扰影响其正常工作,同时也不对其他设备产生影响工作的干扰。

$EMC = EMI$ (电磁干扰) + EMS (电磁敏感度)。电磁干扰(EMI—electromagnetic interference)是指电磁骚扰引起的装置、设备或系统性能降低。电磁敏感度(EMS—electromagnetic susceptibility)是指在存在电磁骚扰的情况下,装置、设备或系统不能避免性能降低的能力。电磁发射(electromagnetic emission)是指从源向外发出电磁能的现象。

1.3.2 噪声的来源及其耦合方式

1. 噪声源

在焊接环境中噪声源有系统外部的和系统内部的。

系统外部的噪声源主要是邻近的设备中有高频信号源,如正在工作的超声信号,包括高频逆变器、高频焊机、高频起弧器、晶闸管电源、继电器、接触器、有炭刷的直流电机以及重型设备的启动等。

系统内部的噪声源是系统内部的高频信号源,如晶闸管电源、逆变电源、高频起弧器、焊丝送丝系统、数字电路中的数字脉冲信号以及有高频信号分量的输出信号等。

2. 噪声耦合方式

(1) 传导耦合噪声 通过导线耦合到电路中的噪声是传导耦合噪声,当导线通过具有噪声环境时,即拾取噪声并送到电路中而形成干扰。这种噪声是与信号源串联的,属于串联干扰,又叫做正态干扰,解决办法是在干扰进到敏感电路之前进行去耦(去耦的方法就是采用适当的滤波电路),或使噪声源远离输入导线。

(2) 经公共阻抗耦合 这种耦合一般发生在两个以上电路的电流流经一个公共阻抗时,一个

电路在该阻抗上的电压降会影响到另外电路。这种耦合方式的干扰称为共态干扰,可为交流,也可为直流,是一种较难抑制的干扰源。

(3) 电场和磁场 辐射的电场和磁场也会造成噪声的耦合。应当明确,所有的元件及导线当有电荷运动时,都会辐射电磁场。

3. 噪声耦合途径

噪声耦合主要通过或靠近噪声区的输入信号线、电源、公共地线及空间进行,其中空间耦合的作用相对前几个途径的作用要小一些。

1.3.3 抗干扰方法及其设计

在计算机控制系统中,抑制各种噪声干扰的方法可从硬件角度和软件角度去实施。

1. 硬件措施

从硬件的角度,即在电路中抑制干扰的方法有屏蔽、接地、平衡、滤波、隔离、频域或时间范畴的对消、改进信号传输电缆的设计等方法。其中常用的具体办法列举如下:

(1) 抑制噪声源 采用如下抑制措施:

- 1) 用屏蔽罩罩住噪声源。
- 2) 限制脉冲上升时间。
- 3) 屏蔽体在两端接地,以抑制辐射干扰。

(2) 消除噪声耦合 采取如下消除措施:

1) 绞合并屏蔽信号线(高频可用同轴电缆),用来防护低电平信号的屏蔽电缆在一端接地(用于高频的同轴电缆其屏蔽层两端接地),信号导线的屏蔽要绝缘,有噪声的和无噪声的导线要分开。

2) 当低电平信号线和带有噪声的导线在同一插接件上时,要把它分开,并在它们中间设置地线,在分立的插件上要对通过接线柱的信号线加以屏蔽。

3) 高电平和低电平设备之间应避免采用公用地线,金属件(机壳等)地线和电路地线要分开,电路只在一点接地(高频电路除外),地线应尽可能短并有足够的截面积。

4) 对于金属表面的防护涂料应采用导电性涂料,不用非导电性涂料。

5) 应用灵敏设备时,要使信号源和负载在工作时地对地平衡。

6) 灵敏的设备(信号的输入电路)要放在屏蔽罩内,进入屏蔽罩内的导线要滤波或去耦,引线的长度应尽量短。必要时可将其地线浮空。

7) 用低阻抗电缆。

8) 避免环路并考虑用以下器件断开环路:隔离变压器、平衡变压器、隔离放大器、光耦合器、差分放大器等。

9) 适当的电源去耦。

(3) 抑制干扰的主要方法 抑制干扰可采取如下几种方法:

1) 电源去耦 计算机控制系统中电源是噪声耦合的主要途径之一,因此电源的正确选择和有效去耦是抑制干扰的最有效的方法之一。通常,开关型电源或逆变型电源比普通选用变压器降压然后整流的稳压电源具有更好的抗干扰能力,目前PC机用的开关型电源都具有较好的抗干扰能力。如采用普通稳压电源则要在变压器原边加去耦电路,通常的去耦电路如图5-1-19所示。其中电感最好用空心线圈或用高频磁性材料做铁心,电容应采用高频电容。

在每块插件板的电源输入端对地都应并接电容(电解电容和

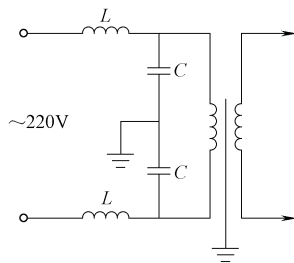


图 5-1-19 电源去耦电路

高频电容并用), 每个集成块的电源输入端也应并接高频电容。有噪声源或敏感电路的插板最好单独供电。如工厂电源质量较差, 应考虑从厂级电力变压器直接向计算机控制系统供电。

2) 地线设计: 地线也是噪声耦合的主要途径之一, 这一点往往被忽视。在计算机控制系统中设计地线应注意以下几点:

① 印制电路板上的地线不要形成封闭环路, 地线尽可能宽, 但地线所包围的面积应尽可能小, 元器件的接地点(公共端)应按信号传递方向顺序接地, 输出电路的地电流不应通过输入电路的地线。

② 数字电路与模拟电路的地线只应在插板的地线输出端连接在一起, 其他点不能相连。

③ 计算机控制系统的地线应单独埋设, 与控制对象的地线分开, 更不要与车间的公共地线相连。

3) 输入和输出信号线应尽量远离, 在印制电路板上一般布置在板的不同面。

4) 如控制对象工作电压为几十伏甚至几百伏或控制对象中有较强的噪声源, 则计算机控制系统与控制对象之间应采用隔离放大器或光耦合器进行完全电隔离。一般情况下, 模拟量用隔离放大器或线性光耦合器, 数字脉冲信号用光耦合器。

5) 计算机控制系统硬件应放在金属屏蔽箱内, 在噪声环境恶劣的环境中, 可考虑在敏感电路的印制电路板的两面加屏蔽板(铝板)。

6) 设置软开关(即可用软件控制的开关), 如用于数字量的三态门或驱动器, 用于模拟量的模拟开关等。这样可以在计算机控制系统与被控对象在加电后, 后者仍处于脱机状态, 用软件来控制计算机控制系统与被控对象联机或脱机。

2. 软件措施

应当认识到, 一个好的软件可以在提高系统抵御错误和外界干扰方面起重要作用。用软件来抑制干扰的方法主要是采用软件容错技术和数字滤波技术。

(1) 软件容错技术 软件容错技术就是在系统由于本身硬件故障或外界干扰而出错的情况下, 使系统仍能正常工作。因为硬件故障和外界干扰造成的系统出错一般 70% ~ 80% 是瞬时性故障, 只要软件在出现瞬时性故障后, 仍能按原来程序继续运行, 这样就能实现容错而抑制干扰的目的。其具体方法包括以下两个方面。

1) 时间冗余: 时间冗余就是用消耗时间资源来达到容错的目的。其方法有两个: 指令复执与程序卷回。

① 指令复执就是当硬件故障或干扰使程序运行发生错误时, 不用中断程序运行重新启动, 而是一旦发现错误仅重新执行被错误破坏的现行指令。指令复执可用编程来实现, 也可用硬件来实现。但其基本要求是: 当发现错误时能保留现行指令的地址和该指令使用的初始数据。这就要求每执行一条重要指令时, 检查其结果是否有错, 一旦发现有错就停止执行下面的指令, 而让程序计数器 PC 返回原处, 重新执行由于干扰而出错的指令, 通常情况下, 往往指令复执一次后, 故障仍未消除, 所以需要复执多次。一般可用硬件控制复执多次(例如 8 次), 或控制指令复执的时间。在规定的次数或时间内, 故障消失, 则复执成功, 否则复执失败, 可进行报警或调用备用设备。

② 程序卷回则是重复执行一段程序。编程时需要注意保护重复执行的程序段的断点与现场。例如对于计算机由于故障而进入“死循环”或计算机脱离规定的程序, 可利用计算机中的可编程定时器/计数器(例如 CTC)的某通道定时或定计数向 CPU 申请中断, 而在用户程序中定时或定计数向定时器/计数器送控制字禁止其申请中断, 然后再对其进行初始化, 恢复原有功能。这样, 当程序正常运行时, 由于程序在定时器/计数器的该通道即将申请中断前就对其进行初始化, 所以定时器/计数器的该通道永远不能向 CPU 申请中断。但一旦程序运行发生故障, 如进入死循环或计算机脱离了该程序, 则定时器/计数器在规定时间到后就向 CPU 申请中断, 使 CPU 返回该程序的起

始点重新运行或重新启动。

2) 信息冗余: 信息冗余是靠增加信息的多余度来提高可靠性。一般采用各种校验码如奇偶码、剩余码、余3码、海明码、法尔码、循环码来检查错误。这种方法尤其在计算机通信中常用。

(2) 数字滤波 对于采集进计算机系统的数字, 则可用下列数字滤波的方法去除干扰:

1) 程序判断滤波: 程序判断滤波法是根据生产经验确定出两次采样输入信号可能出现的最大偏差作为门限, 对超过此门限的采样值则认为是干扰信号, 给予去除。

2) 中值滤波: 中值滤波是对某个参数连续采样 N 次 (一般 N 取奇数), 然后把 N 次采样值从小到大排队, 再取其中间值作为本次采样值。 N 值一般取 $5 \sim 9$, N 值太小滤波效果差, 太大则采样控制时间将增长。

3) 算术滤波: 把 N 个采样值相加, 然后取其算术平均值作为本次采样值。平均次数 N 取决于平滑度和灵敏度。 N 值增大, 平滑度提高而灵敏度降低。

4) 加权平均滤波: 将各采样值取不同比例, 然后计算其和或平均值。这种方法可以根据需要突出信号的某一部分, 抑制信号的另一部分。

计算机控制系统的抗干扰技术主要靠实践经验, 工作现场不同, 采取措施的侧重点也不同, 应灵活选用。

1.4 焊接过程自动控制方法

以模糊逻辑、人工神经网络和专家系统为标志的人工智能技术成为控制领域中的重要研究方向, 取得了很多重大的理论成果, 并在实际中有大量成功的应用实例。在弧焊电源和焊接质量的控制中也出现一些成熟的应用技术。

焊接自动控制系统的分类方法很多, 常用的分类方法有以下几种。

(1) 按给定量的变化规律分类 可分为恒值控制、程序控制和随动控制系统。

1) 恒值控制系统: 系统的输入量 (给定) 为恒定值, 对应的输出量也保持恒定, 该系统为恒定值控制系统。

2) 程序控制系统: 输入量和输出量按程序变化的系统称为程序控制系统。

3) 随动系统: 输出量能够迅速而准确地跟随输入量的系统称为随动系统。

(2) 按照组成元件特性分类 可分为线性和非线性系统。

1) 线性系统: 构成系统所有元件都是线性元件的系统称为线性系统。

2) 非线性系统: 构成系统的元件中含有非线性元件的系统称为非线性系统。

(3) 按照系统中的信号分类 可分为连续和离散系统。

1) 连续系统: 系统内各处的信号都以连续的模拟量传递的系统称为连续系统。

2) 离散系统: 系统内某处或数处信号是以脉冲序列或数码形式传递的系统称为离散系统。

1.4.1 焊接工艺的程序控制

各种焊接方法都要按照一定的程序控制焊接过程, 如带高频引弧器的 TIG 焊工艺控制时序和 CO_2 焊的工艺控制时序, 详见第1篇的2.6.2节。

1.4.2 焊接质量控制原理

1. 引弧和收弧控制

不同的焊接方法, 引弧方式也不同, 对于 TIG 焊, 采用非接触引弧, 一般需要采用专门的高频振荡引弧电路, 引弧成功后被切除, 一般引弧成功率较高。而熔化极气体保护焊则采用接

触引弧, 弧焊电源的引弧性不好, 会产生焊丝爆断或使焊缝起点不好。在收弧过程中, 电流应缓慢减少到零, 让焊丝回烧以填平弧坑, 减少弧坑裂纹等焊接缺陷, 且在焊丝末端不要留下较大小球。

对于脉冲焊一般采用热脉冲起弧, 图 5-1-20a 为实测脉冲起弧电流波形。按照热脉冲起弧电流波形能够较好地完成起弧, 起弧点熔深比普通起弧好, 同时热起弧对铝板预热充分, 起弧过程电弧相对稳定, 并不扰乱焊接气氛, 焊缝气体保护状况较好。热起弧燃弧和正常焊接过程的过渡, 是引弧成功的关键。既要保证有足够的能量来维持电弧的燃烧, 又不能提供过大的能量引起焊丝爆断。

基于渐次脉冲过渡小电流填坑和脉冲削球思想, 合理制定收弧控制方案, 进行数字化收弧控制试验。图 5-1-20b 实测双脉冲收弧电流波形。正常焊接结束后, 持续输出 3~6 个依次递减的脉冲能量, 从而顺利平滑过渡到小电流填坑状态, 填坑的能量视不同焊接电流大小而定。最后, 输出一个强脉冲将焊丝末端的积球削掉。

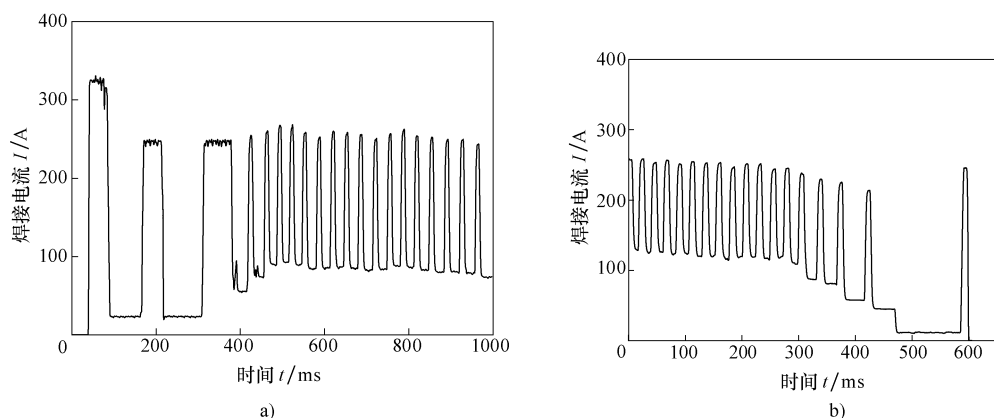


图 5-1-20 热脉冲起弧和收弧电流波形

a) 起弧电流波形 b) 收弧电流波形

2. 弧焊电源的输出波形控制

在熔化极气体保护焊中, 熔滴的形成、尺寸、过渡模式和熔滴行为等是影响焊接工艺性能、焊缝成形和焊接质量的重要因素, 熔滴过渡及行为一直是焊接工作者研究的热点。在熔化极气体保护焊中, 典型的熔滴过渡模式有 CO_2 短路过渡和脉冲 MIG 焊的射滴过渡, 研究熔滴过渡模式及行为的目的之一是要对熔滴过渡过程加以控制。

多功能数字化弧焊电源在控制逻辑和时序上比常规电源复杂得多, 除了要响应各种开关量, 还需要接收来自电脑和人机交互系统等的信号。控制系统软件设计的基本要求就是能够良好地接收并响应信号。焊接方法包括 CO_2 焊、脉冲 MIG 焊、双脉冲焊。

起弧方式和焊接过程控制系统流程图及通信中断响应流程如图 5-1-21a、b 所示。

(1) 短路过渡的波形控制 在 CO_2 焊中小电流规范下, 熔滴主要是短路过渡, 它是在电压较低、弧长较短的时候发生的, 是燃弧与短路交替进行的不规则周期性变化过程。在短路过渡过程中, 焊接电流起着极其重要的作用。焊接电流的大小及变化率既控制焊丝的熔化, 熔滴过渡过程, 又影响飞溅的产生和焊缝成形。而焊接电流是焊机输出特性和电弧特性综合作用的结果。焊接工作者研究出各种有效的控制方法, 典型的有恒压特性控制法、复合外特性控制法、波形控制法、脉动送丝控制方法等。这些控制方法的实质是将焊丝熔化、熔滴过渡过程、飞溅、焊缝成形分别或分时予以控制。目前普遍关注的简便而有效的方法是直接对弧焊电源输出的波形进行控制, 简称为波控

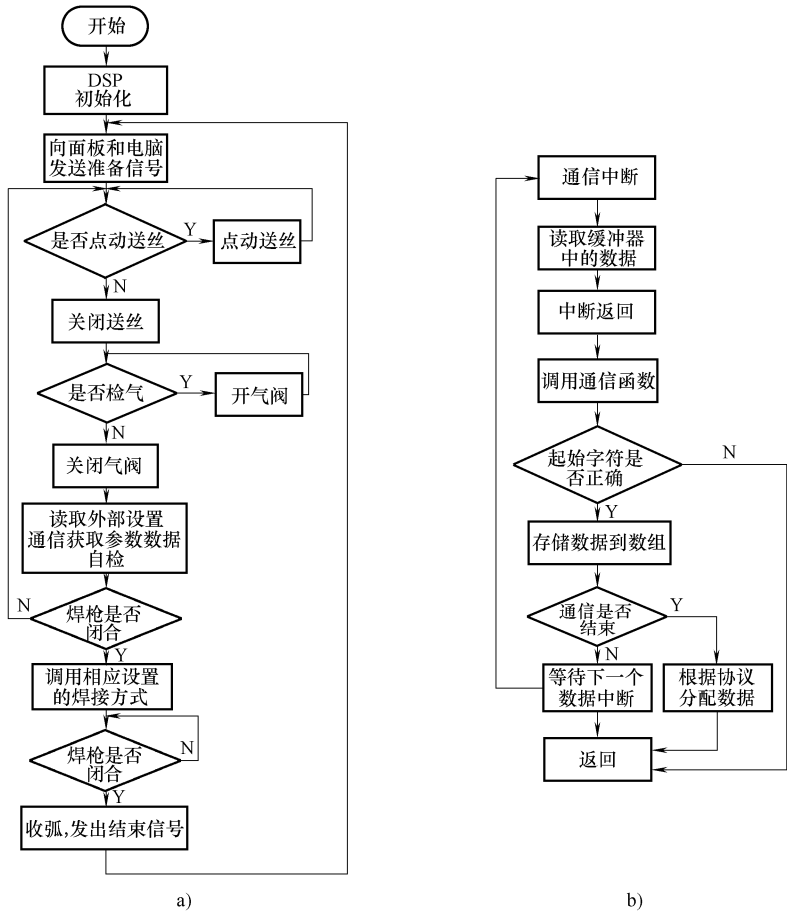


图 5-1-21 控制系统流程图

法。在波控法中，比较成功的是美国林肯公司的表面张力过渡（STT：Surface Tension Transform），详见第 1 篇 2.6.2 节。

北京工业大学提出了自然波形控制方案，如图 5-1-22 所示。控制方案的基本思想是：燃弧初期通过提高电压 $U_{\max}$ 和斜率 K_{uI} 提高燃弧能量，控制熔滴的形成和燃弧能量，而后通过斜率 K_{uII} 控制电压的缓降，适应弧长的减小，促进熔滴整形并与熔池自然接触；在短路阶段，熔滴与熔池接触后，采用较低的短路润湿电流 I_W 促进熔滴在熔池上铺展，然后再调节拐点电流 I_t 以加速短路小桥形成缩颈，缩短短路时间，促进熔滴过渡，最后通过斜率 K_I 峰值电流 $I_{\max}$ 和峰值限制电流 I_M ，从而抑制熔滴过渡时的电爆炸能量，减小飞溅。与常规波形控制方式相比，自然波形控制在中、大焊接参数区间内，抑制瞬时短路作用比较明显，短路过渡频率提高，焊接电弧稳定性增强。CO₂ 短路波形控制焊焊接流程如图 5-1-23 所示。

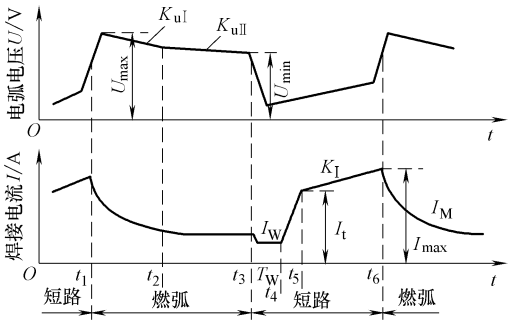


图 5-1-22 自然波形控制方案

(2) 脉冲波形的控制 常规 MIG/MAG 焊工艺, 只有当焊接电流大于临界电流时才能得到稳定的喷射过渡, 包括射滴过渡和射流过渡, 然而临界电流往往比较高, 不宜用于焊接薄板和全位置焊缝。为此, 又发明了脉冲 MIG/MAG 焊法。该法可以将焊接电流平均值减小到 50 ~ 60A 仍能获得稳定的焊接过程, 扩大了 MIG/MAG 焊的使用电流范围。图 5-1-24 为脉冲 MIG 焊电流波形参数, 脉冲 MIG 焊工艺是一种焊接质量比较高的熔化极气体保护焊方法。它具有熔滴过渡过程可控, 平均电流比 GMAW 喷射过渡的临界电流低, 因而母材热输入量低, 焊接变形小, 适于全位置焊接, 生产效率高。脉冲 MIG 焊的熔滴过渡形式为: 多脉一滴、一脉一滴和一脉多滴, 其中一脉一滴是所有过渡形式中最理想的一种, 要获得这种熔滴过渡形式, 焊接参数之间的配合尤为重要。脉冲焊的焊接参数多, 除了电弧电压、送丝速度和焊接速度外, 还有脉冲参数, 包括峰值电流 I_p 、峰值时间 t_p 、基值电流 I_b 和基值时间 t_b 。图 5-1-25 所示为单脉冲焊接流程图。

(3) 双脉冲波形的控制 实现双脉冲焊接有多种方法, 一种是以 KemppiPro 增强型为代表的送丝速度与焊接电流均按低频进行切换, 另外一种是以 OTC 为代表的送丝速度不变, 仅按低频切换熔化速度。但当前公认焊接效果最好的实现方法是高频脉冲的低频调制。

在送丝速度不变的条件下, 使焊机输出的高频脉冲电流具有两个不同的平均值电流 I_{AV1} 和 I_{AV2} , 第一群高频电流脉冲的平均值为 I_{AV1} ; 第二群高频电流脉冲的平均值为 I_{AV2} 。这两个平均电流, 按某一低频周期转换, 由于平均电流值不同, 使焊丝的熔化速度, 自然也按这一低频周期发生变化, 从而获得了鱼鳞纹状的焊缝外观。这个方法就称为高频脉冲的低频调制。其中, 高频电流脉冲是为了实现一脉一滴的熔滴过渡, 使焊接具有脉冲 MIG 焊的优点, 而低频脉冲电流是为了获得鱼鳞纹状的焊缝外观。由于低频脉冲电流 I_{AV1} 和 I_{AV2} 的值不同, 在焊接过程中对熔池产生一定的搅拌作用, 促使熔池中的气体排出, 减少了焊

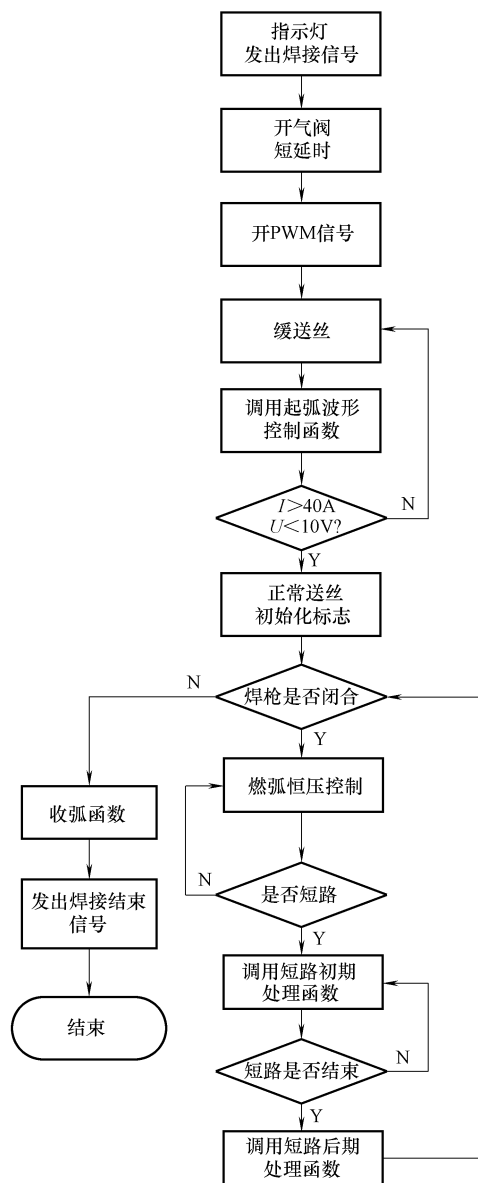


图 5-1-23 CO₂ 短路波形控制焊接流程图

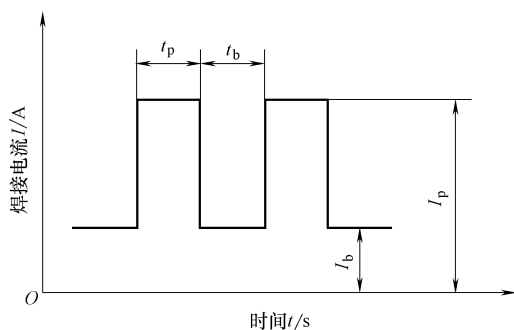


图 5-1-24 脉冲 MIG 焊电流波形参数

缝中气孔的形成，进而提高了焊接质量，弥补了单脉冲 MIG 焊的不足。典型的双脉冲焊电流波形如图 5-1-26 所示，图中 T_S 表示强脉冲时间， T_W 表示弱脉冲时间， T_{BS} 、 I_{BS} (T_{PS} 、 I_{PS}) 分别表示强脉冲基值（峰值）时间和电流， T_{BW} 、 I_{BW} (T_{PW} 、 I_{PW}) 分别表示弱脉冲基值（峰值）时间和电流。图 5-1-27 所示为双脉冲焊接流程图及强、弱脉冲子流程程序。

3. 一元化调节技术

在焊接参数的调节中，焊接电流和电压需要有很好的匹配，不同焊接方法其电流和电压之间的关系也不同。在某一焊接电流值下，有一个对应的最佳电压值，只有电流和电压合理搭配才能使焊丝的熔滴过渡最稳定。电流与电压之间的搭配关系可以从大量焊接工艺试验中得到的，并可绘制出一条一元化曲线。在焊接过程中，通常采用的是电压优先的一元化参数调节。根据焊接材料和焊丝直径的不同，将弧焊电源电压给定电压信号依据一定的比例变换后，作为送丝电机的控制电压，使送丝速度随着弧焊电源输出电压的增大而增大，从而使输出电流随之增大。

1.4.3 焊接过程的 PID 控制原理

PID 控制是工业过程控制中应用最为广泛的一种控制方法，在弧焊过程的控制领域也同样得到焊接工作者的青睐。单片机对于焊接参数的控制，可以通过编程实现有关工艺参数的 PID 控制算法，利用单片机强大的逻辑功能，可以使 PID 控制更加灵活。

1. PID 调节算法

按闭环系统误差信号的比例、积分和微分进行控制的调节器称为 PID 调节器。它具有结构简单、参数易于调整、应用广泛等特点。理想 PID 控制算式如下：

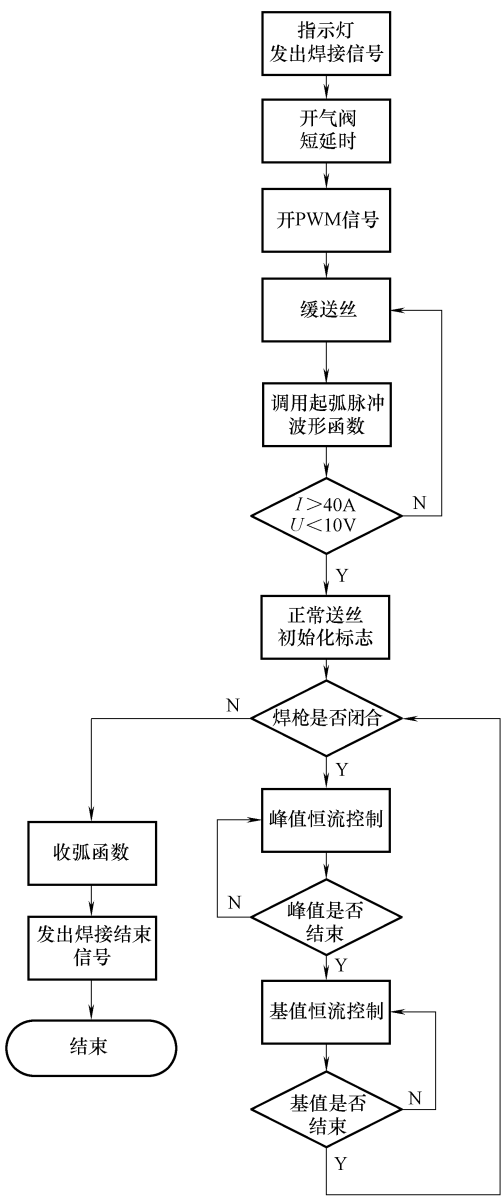


图 5-1-25 单脉冲焊接流程图

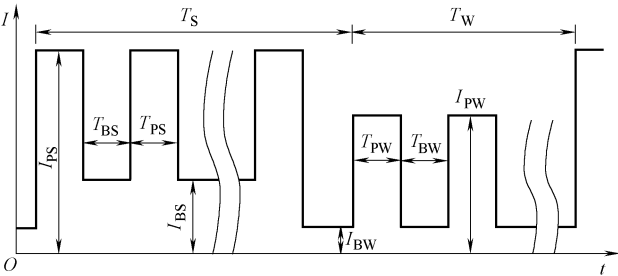


图 5-1-26 典型的双脉冲焊电流波形

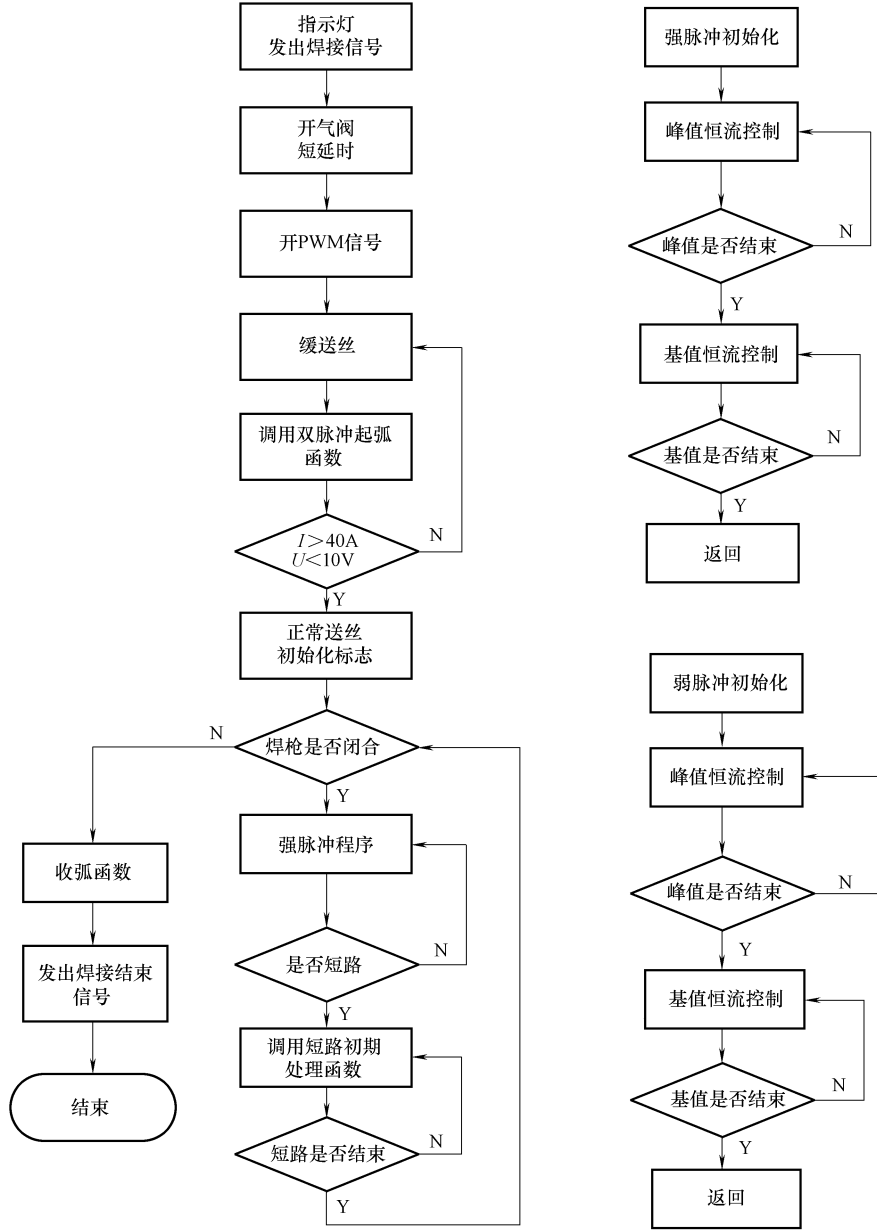


图 5-1-27 双脉冲焊接流程图及强、弱脉冲子流程程序

$$u = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \tag{5-1-1}$$

式中 u ——调节器输出控制量；
 K_p ——比例系数；
 e ——给定量与反馈量之间的偏差；
 T_i 、 T_d ——分别为积分常数和微分常数。

单片机系统是离散控制系统，因此，理想 PID 必须进行离散化，经过离散化的 PID 调节器成为数字 PID 调节器。其算式如下：

$$u(n) = K_p \left\{ e(n) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^n e(j) + \frac{T_d}{T} [e(n) - e(n-1)] \right\} \quad (5-1-2)$$

式(5-1-2)在任何瞬时的控制量输出 u 都对应于执行机构, 如调节阀的位置, 故称此式为位置型算式。在采样时间 $t = kT$ (T 为采样周期) 时刻, 实际数字 PID 调节器的控制规律如下:

$$u(k) = K_p \left[e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i) + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right] + u(0) \quad (5-1-3)$$

式中 $u(k)$ 、 K_p 、 $e(k)$ 、 T_i 、 T_d ——分别与上式对应物理量的说明相同;

$u(0)$ ——控制常量。

$$\text{那么: } u(k-1) = K_p \left\{ e(k-1) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^{k-1} e(i) + T_d \frac{e(k-1) - e(k-2)}{T} \right\} + u(0) \quad (5-1-4)$$

$$\text{因为: } \Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (5-1-5)$$

可以得出:

$$u(k) = u(k-1) + K_p \left\{ e(k) - e(k-1) + \frac{T}{T_i} e(k) + \frac{T_d}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\} \quad (5-1-6)$$

式(5-1-6)被称为增量式 PID 算式。采用这种算法, 算式只与最近几次采样有关, 不易引起误差积累, 可以降低出现机器故障的可能性。

在 PID 调节器中, 比例、积分和微分常数, 需要根据不同的控制对象选择不同的数值, 还需要经过现场调试才能获得较好的效果。

2. 数字 PID 调节参数选择

PID 调节器是一种线性调节器, 系统的给定值和反馈值的差成为偏差, 对偏差进行的比例、积分、微分线性组合构成控制量式(5-1-3)。它们在 PID 调节器中的作用如下:

1) 比例调节作用: 按照比例反应系统的偏差, 系统一旦出现了偏差, 比例调节立即产生调节作用以便减少偏差。比例作用大, 可以加快调节, 减少误差, 但是过大的比例, 使系统的稳定性下降, 甚至造成系统的不稳定。

2) 积分调节作用: 使系统消除稳态误差, 提高无差度。因为有误差, 积分调节就进行, 直至无差, 积分调节就停止。积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_i , T_i 越小, 积分作用就越强。反之, T_i 大则积分作用弱, 加入积分调节可使系统稳定性下降, 动态响应慢。积分作用常与另两种调节规律结合, 组成 PI 调节或 PID 调节器。

3) 微分调节作用: 微分作用反映系统偏差信号的变化率, 具有预见性, 能预见偏差变化的趋势, 因此能产生超前的控制作用, 在偏差还没有形成之前, 已被微分调节作用消除。因此, 可以改善系统的动态性能。在微分时间选择合适情况下, 可以减少超调, 减少调节时间。微分作用对噪声干扰有放大作用, 因此过强的微分调节, 对系统抗干扰不利。此外, 微分反映的是变化率, 而当输入没有变化时, 微分作用输出为零。微分作用不能单独使用, 需要与另外两种调节规律相结合, 组成 PD 或 PID 控制器。

一般来说, 被控对象的精确数学模型很难建立, PID 调节参数的选择需要反复调试才能找到比较理想的参数值, 对不同的控制系统, 也没有参考值可循, 但是可以根据上述 PID 调节作用原理, 对参数进行选择。

如果输出能迅速达到目标值, 但是过冲很大, 可能原因是比例系数过大, 或者微分作用较弱, 对对象的反应不敏感。

如果输出达不到目标值, 小于目标值的时间较多, 可能原因是比例作用较小, 或者积分作用较小, 对偏差补偿不足。

如果输出能够基本控制在目标值上, 但是上下偏差过大, 经常波动, 可能原因为积分作用过

大，引起系统不稳，或者微分作用过小，对即时变化反应不够快，也可能是调节周期短，系统调节频率过大。

如果系统受工作环境影响较大，对外部干扰敏感，可能原因是微分作用太大，或者是调节周期过长，不能及时修正。

3. 带死区的数字 PID 控制算法

焊接过程是一种非线性系统，采用 PID 调节的控制算法，由于积分饱和、系统干扰等原因，控制量的超调可能很大，为了避免控制量的过大或者过小，在应用中，设置控制量的死区，对控制量进行限制。

$$u_k = \begin{cases} u_{kmin} & u_k \leq u_{kmin} \\ u_k & u_{kmin} < u_k < u_{kmax} \\ u_{kmax} & u_k \geq u_{kmax} \end{cases} \tag{5-1-7}$$

在式（5-1-7）算式中对控制量设置了范围，避免了系统过量的超调，增加了稳定性。

1.4.4 焊接过程的模糊控制原理

美国柏克莱加州大学的 L. A. Zadeh 教授分别于 1965 年、1968 年和 1973 年发表了模糊集、模糊算法和基于语言变量建立模糊逻辑系统方法等具有开创性的研究论文，奠定了模糊逻辑作为一门新学科的理论基础。T. J. Procky 和 E. H. Mamdani 共同提出了自学习概念，使模糊系统的性能大为改善。M. Braae 和 D. A. Rutherford 对模糊控制算法进行了系统的分析。D. Willeys 给出了最优模糊控制方法。S. Yasanobuo 等人研究了预测模糊控制。K. Hitrota 和 W. Pedrycz 提出了随机模糊集理论。J. J. Buckley 等人研究了专家模糊控制理论。J. B. Kiszka 等人分析了模糊系统的稳定性。日本学者在促进模糊控制技术实用化方面做了大量的卓有成效的工作，使模糊控制的应用遍及众多工程领域。我国模糊逻辑理论研究处于世界领先地位，但应用技术水平比较落后。国内外焊接界的专家学者较早认识到模糊控制在焊接过程中有着广阔的应用前景，积极将模糊控制用于焊缝跟踪、焊接质量及弧焊电源、设备的控制中。

1. 模糊控制原理

模糊控制由模糊化、模糊推理和解模糊化三个部分组成。模糊化的目的是将过程状态信息精确值转变为语言变量监督学习模糊子集的隶属函数。模糊推理是利用模糊知识库中的模糊关系，推导出模糊控制动作的过程，可用 Zadeh、Mamdani、Sugeno、Larsen、Turksen、Kosko 等模糊推理方法加以实现。解模糊化则是将模糊控制子集转变为确切的控制量输出。常用的方法有最大隶属度法、最大值平均法、重量中心法和取中位数法。如图 5-1-28 所示，模糊控制器主要由三部分组成：精确量的模糊化、模糊算法器及输出信息的模糊决策。模糊控制的过程如下：首先将被控对象的输出参数由精确量转换成模糊量；运用模糊逻辑对模糊量进行推理，做出决策，并输出模糊控制量；将

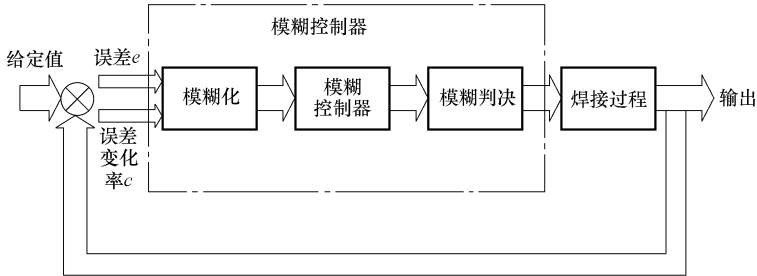


图 5-1-28 焊接过程的模糊控制原理框图

这些模糊量再转换成精确量对被控对象进行调整。

(1) 语言变量的确定 以 CO₂ 焊接过程的电流波控为例来分析焊接过程模糊控制的特点。焊接电流的偏差 e 及其偏差变化率 c 作为输入语言变量 E 和 C ，控制量 u 作为输出语言变量 U ，分别对应三个模糊子集 E 、 C 和 U 。为了减少超调量和避免振荡现象，保证系统的稳定性，将系统输出的偏差及偏差的变化率同时作为反馈信息。将 E 、 C 、 U 分别划分为 7 挡，形成 7 个模糊子集，分别为 NB、NM、NS、0、PS、PM、PB。每个模糊子集的论域为 $(-6, -5, \dots, 0, \dots, +5, +6)$ ，语言变量的隶属度函数可取三角形、钟罩形或正态分布函数等，则 E 、 C 、 U 从属于每个模糊子集的隶属度函数。如图 5-1-29 所示为典型的三角形隶属度函数。

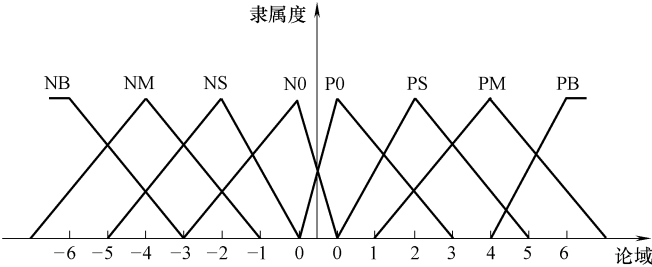


图 5-1-29 隶属度函数曲线示例

如图 5-1-29 所示为典型的三角形隶属度函数。表 5-1-1、表 5-1-2 和表 5-1-3 分别为 E 、 C 和 U 的隶属度函数表。对于输入量 E 和 C 的隶属度函数，在 E 或 C 变化小时，选用高分辨率的隶属度函数以提高系统响应的灵敏度；而在偏差与偏差变化率比较大时，选用分辨率不太高的隶属度函数以增强系统响应的鲁棒性。

表 5-1-1 输入语言变量 E 的隶属度函数

$\mu E(X)$ X	NB	NM	NS	NO	PO	PS	PM	PB
-6	1	0.2	0	0	0	0	0	0
-5	0.8	0.7	0	0	0	0	0	0
-4	0.4	1	0.1	0	0	0	0	0
-3	0.1	0.7	0.5	0	0	0	0	0
-2	0	0.2	1	0.1	0	0	0	0
-1	0	0	0.8	0.5	0	0	0	0
-0	0	0	0.3	1	0	0	0	0
+0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0.6	0.5	0	0
2	0	0	0	0	0.1	1	0.2	0
3	0	0	0	0	0	0.5	0.7	0.1
4	0	0	0	0	0	0.1	1	0.4
5	0	0	0	0	0	0	0.7	0.8
6	0	0	0	0	0	0	0.2	1

表 5-1-2 输入语言变量 C 的隶属度函数

$\mu C(X)$ X	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
-6	1	0.2	0	0	0	0	0
-5	0.8	0.7	0	0	0	0	0
-4	0.4	1	0.2	0	0	0	0
-3	0.1	0.7	0.7	0	0	0	0
-2	0	0.2	1	0	0	0	0
-1	0	0	0.8	0.5	0	0	0

(续)

$\mu_C(X) \backslash C$		NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
X								
0		0	0	0	1	0	0	0
1		0	0	0	0.5	0.9	0	0
2		0	0	0	0	1	0.2	0
3		0	0	0	0	0.7	0.7	0.1
4		0	0	0	0	0.2	1	0.4
5		0	0	0	0	0	0.7	0.8
6		0	0	0	0	0	0.2	1

表 5-1-3 输出语言变量 U 的隶属度函数

$\mu_U(X) \backslash U$		NB	NM	NS	N0	P0	PS	PM
X								
-6		0.8	0.2	0	0	0	0	0
-5		0.4	0.7	0	0	0	0	0
-4		0.2	1	0.1	0	0	0	0
-3		0	0.7	0.4	0	0	0	0
-2		0	0.2	0.8	0	0	0	0
-1		0	0	10	0.5	0	0	0
0		0	0	0.4	1	0	0	0
1		0	0	0	0.5	0.4	0	0
2		0	0	0	0	1	0.2	0
3		0	0	0	0	0.4	0.7	0
4		0	0	0	0	0.1	1	0.1
5		0	0	0	0	0	0.7	0.4
6		0	0	0	0	0	0.2	0.8

(2) 模糊推理 模糊控制规则的选择是模糊控制器的核心，它是人的控制经验与控制思想的归纳和总结，直接影响到模糊控制器的性能。根据模糊语言推理规则，经过模糊数学的运算，便可获得相应的控制策略，即对于每一对输入量 E 和 C ，可得到一个相应的输出量 U 。

确定模糊控制规则的基本原则是：当偏差很大时，无论偏差变化如何，控制量取大值。当偏差为中等大小时，如果偏差变化很大，且向增大偏差的方向变化，控制量取大值；如果偏差变化很大，且向减小偏差的方向变化，控制量取中等大小；如果偏差变化中等大小，且向增大偏差的方向变化，控制量取大值；如果偏差变化中等大小，且向减小偏差的方向变化，控制量取中等大小；如果偏差变化小，控制量取中等大小。当偏差为小值时，但偏差变化很大，且向增大偏差的方向变化，控制量取中等大小；当偏差变化很大，且向减小偏差的方向变化时，控制量取零；当偏差变化中等大小时，控制量取小值；当偏差变化为小值时，控制量取小值。

针对具体的弧焊工艺，根据专家的经验，可以把实际的控制策略归纳出若干条控制规则，并制成模糊控制状态表。表中的每条控制规则都经过论域变换后转化为 E 、 C 和 U 上的模糊集，所有这些控制规则可归结为一个模糊关系 R ，见式 (5-1-8)：

$$R = \bigvee_{i=j=1}^{i=j} E_i \times C_j \times U \tag{5-1-8}$$

$$\mu_R(e,c,u) = \bigvee_{i=j=1}^{i=j} \mu_R(e) \wedge \mu_C(c) \mu_U(u) \tag{5-1-9}$$

$$\forall e \in E \quad \forall c \in C \quad \forall u \in U \quad (5-1-10)$$

对于 CO₂ 焊电流波控这类消除误差的二维模糊控制系统来说，选取控制量的变化原则是：当误差较大时，选择控制量以尽快消除误差为主；而当误差较小时，选择控制量要尽量防止超调，以系统的稳定性为主。表 5-1-4 为模糊控制状态表。

表 5-1-4 模糊控制状态表

$U \begin{matrix} \diagdown \\ E \\ \diagup \\ C \end{matrix}$		NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
C	PB	0	0	NS	NM	NM	NB	NB
	PM	0	0	NS	NM	NM	NB	NB
	PS	PB	PB	0	NM	NM	NB	NB
	0	PB	PB	PM	0	NM	NB	NB
	NS	PB	PB	PM	PS	0	NB	NB
	NM	PB	PB	PM	PM	PS	0	0
	NB	PB	PB	PM	PM	PS	0	0

(3) 模糊判决 模糊控制器输出的控制量是一个模糊子集，它反映控制语言不同取值的一种组合。但是，被控对象只能接受一个控制量，这就需要从输出的模糊子集中判决出一个控制量。从数学上讲，模糊判决是一个由模糊集合到普通集合的映射。模糊判决的方法很多，有最大隶属度法、加权平均法和取中位数法等。其中加权平均法与概率中求数学期望的性质类似，调整加权系数可以改善系统的响应特性，通常多采用此法。

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(U_i) U_i}{\sum_{i=1}^n \mu(U_i)} \quad (5-1-11)$$

在模糊控制过程中，由输入量 E 和 C 便可得出一个控制量 U 。因此，根据表 5-1-1 和表 5-1-2 可知，13 个 E 和 13 个 C 相应得到一个 13×13 的总控制表。由于总控制表的计算工作量大，故采用离线计算方法完成，并将其事先写入单片机的存储器中，在实时控制中，只需通过查表的形式，便可获得实时的控制量 U 。在线控制中，单片机不断对焊接电流采样，将实测值与给定值相比较，得出偏差，再经计算得到偏差变化率。经过量化转换后，变成查询控制表所要求的值，再从控制表中取出控制量，将其乘以量化因子即为实际控制量。模糊控制查询表见表 5-1-5。

表 5-1-5 模糊控制查询表

$U \begin{matrix} \diagdown \\ EC \\ \diagup \\ E \end{matrix}$		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
E	-6	6	6	6	6	6	5	5	4	4	2	1	0	0
	-5	6	6	6	6	5	5	5	4	4	1	1	0	0
	-4	6	6	6	6	5	5	4	3	2	1	0	0	-1
	-3	6	6	6	5	5	4	3	2	2	1	0	0	-1
	-2	6	5	4	4	3	3	2	1	1	0	0	0	-2
	-1	5	4	3	2	2	1	1	0	0	-1	-1	-2	-2
	0	3	3	2	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3
	0	3	2	2	1	1	0	0	-1	-1	-1	-2	-3	-3
	1	2	1	1	0	0	0	-1	-2	-2	-3	-4	-4	-5
	2	1	0	0	0	-1	-1	-2	-3	-3	-4	-4	-5	-6
	3	0	0	0	-1	-2	-3	-3	-4	-5	-5	-6	-6	-6
	4	0	0	-1	-2	-3	-3	-4	-5	-5	-6	-6	-6	-6
	5	0	0	-1	-2	-4	-4	-5	-5	-5	-6	-6	-6	-6
	6	0	0	-1	-2	-4	-4	-5	-5	-6	-6	-6	-6	-6

2. 自组织模糊控制器

普通模糊控制器的主要缺陷是自学习能力差, 经过不断改进, 性能得到大幅度提高。图 5-1-30 所示为自组织模糊控制器的原理框图。自组织模糊控制 (SOFC) 的原理是在基本模糊控制器的基础上增加了三个环节: 性能测量环节、控制量校正环节和控制规则校正环节。它的工作过程是: 自组织模糊控制器在每次采样时, 都计算偏差及偏差变化率; 通过性能测量环节, 求出输出特性的校正量 $P(nT)$; 再通过控制量校正环节, 求出控制量的校正量 $r(nT)$; 进而修正模糊控制规则。SOFC 是先进行系统的模糊辨识, 再进行在线实时闭环控制。它是在控制过程中不断获取新的信息, 依靠自学习功能, 及时修改控制规则, 并对控制量做适当的调整, 从而使得其鲁棒性能有很大改善。

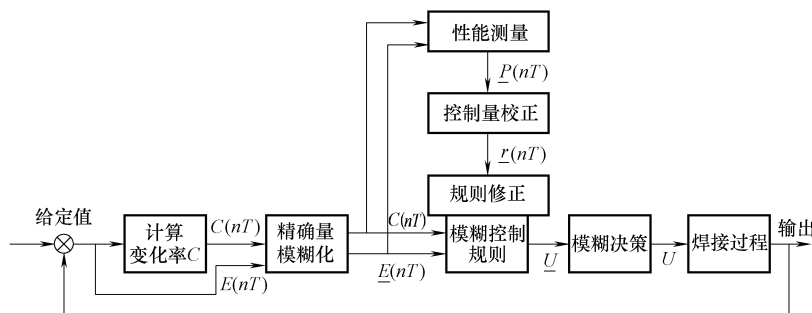


图 5-1-30 自组织模糊控制器的原理框图

(1) 性能测量 系统性能的优劣取决于系统的实际输出值与期望输出值之间的偏离程度, 根据其差值的大小, 就可计算出对输出特性应该进行的校正量 $P(nT)$, T 为采样周期, n 为采样周期序号。通常用每个采样周期偏差 e 和偏差变化率 C 来表征输出特征, 因而可根据这两个值衡量实际输出与期望输出间的偏离程度, 可用模糊集合方法得出一个性能测量表。

算出系统输入的校正量 $r(nT)$, 以使下一周期的输出得到改善, 系统输出和输入之间的关系和系统模型的类型不同, $r(nT)$ 和 $p(nT)$ 的关系也不同, 只有先掌握系统的输入和输出之间的关系和系统模型, 才能确定 $r(n)$ 与 $p(nT)$ 的关系, 求得 $r(nT)$ 。

(2) 控制规则修正 控制规则的修正是根据所需要的校正量 $r(nT)$ 来进行的。对单输入、单输出系统来说, 若系统有一定的延滞性, 即 $(nT - mT)$ 时间的控制对现时 nT 时刻的输出有影响, 则控制要进行必要的修正, 如果用 $E(nT - mT)$ 、 $C(nT - mT)$ 、 $U(nT - mT)$ 分别表示 $(nT - mT)$ 时刻的偏差率, 偏差变化率和控制量, 则期望的控制量为 $V(nT - mT) = U(nT - mT) + r(nT)$, 控制规则的修正如下:

若原来的控制规则为: IF $E = E(nT - mT)$ and $C = C(nT - mT)$ then $U = U(nT - mT)$

那么, 现在的控制规则为: IF $E = E(nT - mT)$ and $C = C(nT - mT)$ then $U = V(nT - mT)$

写成关系矩阵形式:

$$R1(nT) = E(nT - mT) \times C(nT - mT) \times U(nT - mT) \quad R2(nT) = E(nT - mT) \times C(nT - mT) \times V(nT - mT)$$

$$R1(nT) = E(nT - mT) \times C(nT - mT) \times U(nT - mT)$$

$$R2(nT) = E(nT - mT) \times C(nT - mT) \times V(nT - mT)$$

则修正后的新关系矩阵为

$$R(nT + T) = \{R(nT) \wedge R1(nT)\} \vee R2(nT)$$

其中“ $\wedge$ ”表示交运算, “ $\vee$ ”表示并运算。

模糊控制软件主要包括两部分, 其一是计算机离线计算模糊关系矩阵, 得到模糊控制表的程

序；其二是计算机在模糊控制过程中在线计算输入变量（误差，误差变化率）并将它们模糊量化处理，查找模糊控制表后，再作输出处理的程序。

模糊逻辑技术在焊接过程中的应用途径有以下几种：

① 专用的模糊逻辑芯片及开发工具，其速度、控制精度高，是今后的发展方向，但目前成本较高，作为实验室研究可考虑采用。

② 基于通用单片机的汇编代码开发软件，速度和精度较高，实现方便，对于采用单片机的场合，所需附加成本很少，是一般焊接过程的首选方式。

③ 基于 PC 微机的高级语言开发平台，速度慢，对于复杂多变量的焊接过程和设备可以采用。

3. 弧焊电源的模糊控制技术

电子控制弧焊逆变器为实现智能控制提供了可能性。如以电流偏差和偏差变化率作为控制量，采用 MCS-51 单片机可以实现晶体管式弧焊逆变器的模糊控制器，试验表明：模糊控制的整机运行稳定，飞溅小，焊缝成形好。日本 Panasonic 公司已推出第二代机器人用智能型 IGBT 式弧焊逆变器 AA II -350/500。其中 350A 实现恒定焊缝宽度控制，500A 实现恒定熔深控制。AA II 自动识别焊接电流改变时，焊丝伸长的变化量，利用模糊逻辑，建立焊缝宽度或熔深与合适的供丝速度和输出电压之间的关系，从而稳定焊接质量。为了提高模糊控制的响应速度，采用了 16 位的单片机。通过工艺实验，对 CO₂ 焊短路过渡过程优化组合出 400 种电流波形，作为模糊知识库，保证输出最佳焊接参数，实现高速、高质量的焊接。

弧焊电源的模糊控制可采用专用的模糊芯片或通用单片机加上模糊逻辑软件实现。专用芯片的速度高，但价格贵，修改模糊控制算法和模糊规则不太方便。采用通用的单片机成本低，可通过软件编程方便地修改模糊控制规则和算法，灵活性好，是目前较为合适的选择。

4. 弧焊质量的模糊控制

焊接工艺是一个多输入、多输出、本质非线性的系统。焊接过程参数之间存在着不确定性，难以建立精确的数学模型，无法采用常规 PID 控制方法。采用一步超前（差拍）自适应算法与递归最小方法可以建立 GMAW 的二阶动态模型，进行在线参数估计，获得期望的焊缝几何尺寸，但这只是在焊接工作点附近的局部线性化，其模型的普适性不强。然而熟练的操作人员根据肉眼视觉观察得到的焊缝信息，归纳出焊接质量变化的大或小等一些模糊语言变量，用手工调节焊接速度、电弧及热量输入等控制量可将焊接质量精确地控制在要求范围内，这是由于焊接过程存在物理化学冶金反应，并伴随剧烈的传热传质过程，在强烈的弧光下，焊接质量的实时检测也很困难，这些系统存在着大滞后、非线性和不确定性，很难建立起对象的精确数学模型。模糊控制正是基于模糊语言变量提出来的，已经证明模糊控制器是一个模型无关的估计器，正适于这种场合的应用。

对于 GMAW 焊接，焊接质量的控制在于保持焊缝熔宽或熔深的恒定，为此，可通过调节工艺参数来实现，如送丝速度、焊接电流等。由传感器得到熔池的反馈信息，通过模糊控制器输出控制量焊接电流和送丝速度。根据经验可总结出如下模糊控制规则：

- ① 若熔宽小且无增大的趋势，则增加焊接电流。
- ② 若熔宽大且无减少的趋势，则减少焊接电流。
- ③ 若熔宽合适且无增大或减少的趋势，则保持焊接电流不变。

上述规则采用模糊语言可描述为：

- ① If e is N and Δe is Z , then Δu is P 。
- ② If e is P and Δe is Z , then Δu is N 。
- ③ If e is Z and Δe is Z , then Δu Z 。

日本学者在焊接过程的模糊控制方面作了大量的卓有成效的工作，Shima Kenji 等人将模糊逻辑用于脉冲 MIG 焊接的熔宽控制，建立了一套弧焊机器人的模糊专家系统。Kannatey-Asibu Elijah

Jr. 等人运用模糊逻辑实现了 MAG 焊的熔池控制。Langari G. 等人采用自适应算法修正模糊子集的特征函数,用模糊子集来描述控制规则,每条规则的内容随焊接过程动态的变化着。根据输出量的变化按在线修正规则来建立弧焊过程的自组织模糊控制系统。1995 年德国的 G. Starke 在 PC 微机平台上,采用模糊逻辑对弧焊机器人的焊接参数进行了优化研究,焊接参数包括焊炬姿态、导电嘴到工件的距离、焊接速度、焊接电压和电流、送丝速度。

国内清华大学的陈强教授与日本的 Shima Kenji 合作系统地研究了弧焊过程的模糊控制。对单变量的 MIG 焊的熔透控制,采用 CCD 传感器提取熔池图像信息,将焊工的操作经验总结成模糊控制规则,实验研究表明 MIG 焊的模糊控制方法对散热引起的熔宽变化作出了很好的响应。近年来,国内外对于多变量的 CO₂ 焊的模糊控制也做了大量的研究,控制目标为:熔池宽度、冷却时间、飞溅率、焊接效率。控制量为:电弧电流、短路电流、焊接速度。多变量系统的模糊控制较为复杂,设计时要借助于专家的经验,并通过试验,不断调整模糊规则,才能完善模糊控制系统。

1.4.5 焊接过程的人工神经网络控制

早在 1943 年心理学家 W. McCulloch 和数学家 W. Pitts 合作提出了最早的神经元模型;1958 年 F. Rosenblatt 首次提出模拟人脑感知和学习能力的感知器概念;1982 年,神经网络研究取得突破性进展。近年来,微电子技术和计算机科学的飞速发展,为神经网络的技术实现提供了有力的支持。人工神经网络在过程建模与控制、模式识别等方面展现了广阔的应用前景。在焊接领域,焊接学科的专家学者也注意到人工神经网络的潜在实用价值,BP 神经网络在焊接接头质量预测与监控、焊接参数设计、焊缝成形控制、焊缝跟踪以及焊接缺陷的检测等方面得到了广泛的应用,并取得了满意的效果。

神经网络主要可分为以下两大类:

- 1) 监督学习。神经元在学习过程中,有教师信号指出网络性能如何(增强学习),或者什么是正确行为(全监督学习)。
- 2) 非监督学习。网络的学习自动进行,找出数据集中的特性,并在输出结果中表示出来。其识别精度取决于特定的模型和学习算法,通常网络学习用压缩的数据表示。

神经网络的学习算法都与某一类的网络拓扑结构相联系,神经网络的结构主要可分为反馈网络和前馈网络。

1. 人工神经控制的软硬件技术

人工神经网络由神经元通过不同的拓扑结构连接起来,配合相应的算法就构成了各种的神经网络。它具有近似于人脑神经元的特性,采用分布式存储信息、具有高速并行运算及很强的学习能力,已经证明神经网络是一线性无关的模型估计器。以 BP 为代表的前馈多层型神经网络有很好的非线性映射能力,由于影响焊接质量的工艺因素很多,它们之间难以建立精确的数学模型,因此采用 BP 等映射类神经网络进行建模和控制非常合适。ART、Kohonen 等神经网络具有较强的模式识别能力,此类神经网络在焊缝识别与自动跟踪方面有良好的发展前景。

目前,美、日、德等国家已推出神经网络软件开发系统、神经网络芯片及 PC 板卡。如美国 MathWorks 公司推出的 MATLAB Neural Network Toolbox,可用于广泛的神经网络结构,支持的算法有:BP 及变种、LVQ、RBF 等,适于工程环境下的神经网络研究、设计和仿真,是目前较为流行的神经网络工具软件。代表性的神经网络芯片有 IBM 公司的 ZISC036,它是一种数字神经网络芯片,具有 36 个并行径向基(RBF)神经元,是真正的并行结构,其扩展不受限制,运行速度与神经元数量无关,芯片具有学习能力。

神经网络用于焊接过程控制的途径有以下两种:

- ① 在 PC 机上采用高级语言编程实现,这可用于焊接过程的离线建模等。由于它是用软件的串

行运算来仿真实现神经网络的并行运算结构,所以,对于实时性要求较高的焊接工艺,如 MIG/MAG、CO₂ 焊的熔滴过渡控制等,则速度往往跟不上。

② 采用具有并行运算能力的神经网络芯片,由专用神经网络软件包开发汇编程序,其运算速度高,适于在线实时控制。目前神经网络芯片含有的神经元还较少,与微电子的最新技术 RISC 相结合,将提高其性能和集成度,从而必将用于生产实际中。

2. 弧焊电源与焊接质量的人工神经网络控制

在弧焊过程中,焊接电流、电弧电压、焊接速度、材料、板厚等都对焊接质量有很大的影响。焊接前通常根据经验预置焊接参数,焊接后焊缝的质量如何则不可能用某一模型进行预测。近年来,国内外不少学者将神经网络用于弧焊过程的建模和控制。1990 年、1992 年 K. Andersen 等人用 BP 神经网络来离线和在线建立 GTAW 的模型,神经网络的输入层有 4 个节点,分别为焊接电流、焊接速度、弧长和板厚;输出层有 2 个节点,焊缝的熔宽和熔深。1992 年美国的 J. Jones 将 BP 神经网络用于 GTAW 和 GMAW 焊接过程的建模型,输出量为焊缝的特性,如熔深、熔宽,控制量为焊接电压、焊接电流、送丝速度和焊接速度。用神经网络所建的模型来预测焊缝的特性。此外,用网络逆向搜索最优的焊接电压、焊接电流和焊接速度。以获得期望的焊缝特性。1993 年华南理工大学把 BP 神经网络用于 TIG 焊,通过熔宽的检测与控制实现了对焊缝质量的有效控制,详见第 1 篇第 2 章 2.6.6 节。1995 年 G. E. Cook 等人(包括 K. Andersen)将 BP 神经网络用于变极性等离子弧焊的过程建模、控制和焊接控制的焊缝轮廓分析。1997 年德国 U. Diltthey 等人采用神经网络来优化 GMAW 的焊接参数,并在线监控其焊接质量。

神经网络建模及控制不同于其他的建模方法,不需对焊接过程作任何假设,模型与实际过程符合较好,且简单易行。神经网络控制具有较强的抗干扰能力,在散热条件急剧变化的情况下,能使系统的输出基本保持恒定。对于非线性的焊接过程,神经网络的适应性强。神经网络逐步渗透到焊接领域,神经网络的理论、软硬件技术还不太成熟,有待完善,对人类大脑的认识,还需要漫长的时间,同时需要 VLSI 的突破,以便提高神经元的集成度,使神经网络芯片中的神经元接近人脑的数量级。神经与模糊和专家系统的结合,可产生更大的威力。神经网络的应用需要结合焊接工艺,不断实践。

1.4.6 焊接过程的专家控制原理

专家系统由知识库、推理机、数据库和人机接口组成。它用一种比较理想的方式来封装从领域专家处获取的知识,建成知识库,对知识库的操作不同于传统的预先定义好的操作方式,每次运行时都各不相同,这取决于推理机的构造。焊接专家系统近年来在国内外有很大的发展,主要集中在焊接工艺、焊接方法选择、焊接结构安全评定等方面。另外,还有焊接变压器设计专家系统和铸铁焊接专家系统等。这些专家系统可以根据完成的焊接工艺评定报告(PQR)制定焊接工艺说明书(WPS),并可以从相关的知识和实例中进行推理来提取出相应的 WPS 报告;还能进行焊接接头组织性能预测、焊接缺陷的诊断等。

专家系统作为人工智能领域的一个重要分支,近年来发展迅速。计算机可以把大量的数据和资料加以整理和归纳形成数据库,同时将有关各方面专家的知识 and 经验集中起来形成若干规则,经过编写的推理机构软件连接起来,从而就能使使用者像有经验的专家,甚至像一群专家的集体对涉及的问题进行判断,并作出决定。计算机软件的发展,在焊接技术领域中的各种实用专家系统,近几年来在发达国家已开始相当规模地应用于生产。

1. 专家系统的组成

一个完整的专家系统通常由六部分组成(见图 5-1-31),分别为知识库、上下文(又称为全局数据库)、推理机、知识获取机制、解释机制和人机接口。其中知识库、上下文和推理机是目前大

多数专家系统（或其他知识库系统）的主要内容，知识获取机制、解释机制和专门的人机接口是所有专家系统都期望有的三个模块，但它们并不是都得到了实现，简单的专家系统不一定具备这三个模块。

（1）知识库（Knowledgebase）用以按特定规律存放领域专家（即有关专业的专家）提供的专门知识。

（2）上下文（Context，又称全局数据库）反映具体问题在当前系统运行（求解）状态下的符号或事实的集合，它由问题的有关初始数据和系统运行（求解）期间所产生的所有中间信息组成。

（3）推理机（Inference engine）在一定的控制策略下针对上下文中的当前问题信息，识别和选取知识库中对当前问题的可用知识进行推理，以修改上下文直至最终得出求解结果。

（4）知识获取机制（Knowledgeacquisition）实现专家系统的自学习。

（5）解释机制（Clarification）解释专家系统向用户提供的结论，回答用户对系统的提问。

（6）人机接口（Userinterface）将专家和用户的输入信息翻译成系统可接受的内部形式，同时将专家系统输出的信息转换成人类易于理解的形式，如文字形式或图形、表格等形式。

2. 建立专家系统的步骤

要建立一个专家系统，通常由知识工程师来完成，其最主要的工作是要通过和领域专家的一系列讨论，获取该领域专门问题的专业知识，再进一步概括，形成概念并建立起各种关系。接着就是把这些知识形式化，用合适的计算机语言实现知识组织和求解问题的推理机制，建成原型系统。最后通过测试评价，在此基础上进行改进以获得预期的效果。这一过程可用下面五个具体阶段加以表示。实际上建造专家系统是一个递归开发的过程，经过五个阶段的初步设计和实现评价之后得到的原型系统，要进一步改进，逐步地向纵深方向生长和完善。

1) 认识阶段：知识工程师要和领域的专家一起交换意见，探讨对所考虑问题的认识，其目的是了解表述问题的特征及其知识结构，以便进行知识库的开发工作，因为专家系统的推理机构和知识库的结构都和专家系统所能解决的问题的知识结构有密切的关系。

2) 概念化阶段：要使认识阶段提出的一些概念和关系变得更明确，所形成的概念必须和问题求解过程的思路一致。

3) 形式化阶段：把上一阶段孤立处理的概念、子问题及信息流特征等，用某种知识工程的工具将其形式化。这一阶段主要是建立模型，解决知识表示方法和求解方法的问题，是建造专家系统过程中最关键和最困难的阶段。

4) 实现阶段：把建立的模型映射到具体领域中去，建成原型系统。

5) 测试阶段：对原型系统及对实现系统时所使用的表示形式作出评价。

建立专家系统是一个递归开发过程，原型系统总是要根据测试情况的反馈信息进行修改，修改的内容包括重新建立概念，重新设计表示格式或者重新改进已实现的系统，但多数是不断补充推理机构和知识库的内容。总之是要通过实现、测试和反馈的多次循环，不断调整规则及控制结构，直到获得所希望的性能为止。如果这时推理部分已经正常，而性能尚未稳定，则必须考虑修改知识库，重新设计表示格式，也是要经过多次循环，改到满意为止。

在焊接领域中应用的专家系统有咨询型、预测型、诊断型、设计型、监视型和控制型等若干个类型的专家系统。

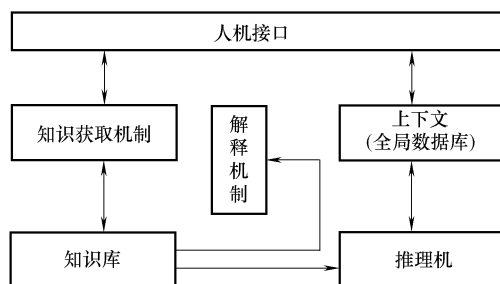


图 5-1-31 专家系统的组成

1) 咨询型专家系统主要用于对焊接工程中的某些专门问题进行咨询, 回答用户提出的焊接技术问题。向用户提供焊接工程所需的材料、成本、及完成工期的核算, 作为焊接工程投标的预算。

2) 预测型专家系统是根据过去和现在得出的模型来推断将来可能发生或出现的情况。例如用来预测焊接产品的市场情况以制订生产计划、确定生产过程, 预测在某种生产工艺条件下焊接构件的残余应力分布与变形, 预测用某种焊接参数焊接后接头的性能等。

3) 诊断型专家系统是根据所获得的数据和事实来推断一个对象(设备或焊接构件)的功能故障或工作寿命, 如焊接机器人故障诊断系统, TIG 焊机故障诊断系统, 由无损检测、材料性能分析、应力分析等组成的焊接结构断裂安全评定专家系统, 桥梁疲劳诊断专家系统等。

1.4.7 焊接过程的其他控制方法

1. 变结构控制

变结构控制是一种非线性控制方法, 它表现为控制的不连续性。变结构控制策略与其他控制方法的不同之处在于系统的结构不固定, 而是可以在动态过程中根据系统当时的状态(如偏差及各阶导数等), 以跃变的方式, 有目的地不断变化, 迫使系统按照预定的控制规律运行。

2. 复合控制

各种控制策略相互渗透和相互结合形成复合控制策略成为一种趋势, 目前应用较多的复合控制策略有模糊 PID 复合控制、模糊变结构复合控制、自适应模糊控制、模糊神经网络控制等。

参考文献

- [1] 胡绳荪. 焊接自动化技术及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] 殷树言. CO₂ 焊接设备原理与调试 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] 杨春利, 林三宝. 焊接电弧基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] 陈善本. 焊接过程现代控制技术 [M]. 北京: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
- [4] 吴林, 陈善本. 智能化焊接技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [5] 赵熹华. 焊接方法与机电一体化 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [6] 黄石生. 弧焊电源及其数字化控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [7] 魏继昆, 谭蓉. 先进焊接设备与维修 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [8] 王晶, 尹显华. 我国焊割设备市场统计分析 & 预测 [J]. 电焊机, 2010, (1): 8-11.

第2章 焊接过程信号检测与故障诊断

本章分析了焊接过程常用的传感器特点、分类和工作原理，以及传感信号常见的处理电路，重点论述了焊接过程电信号、视觉图像和焊接熔透质量的检测方法，以及焊接设备的故障诊断技术。

2.1 焊接过程的传感器技术

通常把能将被测物理量或化学量转换为与之有确定对应关系的电量输出的测量部件或装置称为传感器，它本质上可视为一个非电系统和电系统之间的接口。如果能检测焊接质量的内外状况，并将检测值作为信号输出，以监测和控制焊接生产过程，就称为焊接传感器。

2.1.1 焊接传感器的分类

传感器一般由敏感元件、转换元件和基本转换电路组成，如图 5-2-1 所示。

敏感元件是能直接感受测量，并以确定关系输出某一物理量的元件。如弹性敏感元件将力转换为位移或应变输出。转换元件将敏感元件输出的非电物理量（如位移、应变、光强等）转换成电路参数量

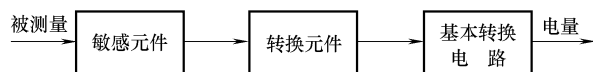


图 5-2-1 传感器的构成

（如电阻、电感、电容等）。基本转换电路将转换元件输出的电信号转换为便于显示、记录、处理和控制的有用信号，如电压、电流、频率、脉冲等。

在电弧焊工艺中，按照监测内容和作用来分主要有以下几类。

- 1) 焊接特性传感器：包括监测电弧长度、焊丝伸出长度、电弧形状、熔池尺寸、焊道外部状况、熔透状况、电弧声音等。
- 2) 自动焊接设备：监测保护气体流量/压力、冷却水压力、过电流、送丝机转矩的传感器。
- 3) 焊接质量监测：通过 X 射线和超声监测焊接质量、记录焊接参数的传感器。

按照传感原理传感器可分为接触式和非接触式传感器。

- 1) 接触式传感器：机械式、机械电子式（开关式、差动变压器式、光电式）。

- 2) 非接触式传感器包括以下种类。

① 利用物理现象的传感器：电磁传感器、电容传感器、超声波传感器、红外辐射传感器、涡流传感器。

② 利用电弧现象的传感：电弧传感器（电弧电流、电弧电压）、电弧光传感器、电弧声传感器。

③ 利用光学视觉传感器：激光视觉传感器、图像传感器、工业电视传感器。

2.1.2 位置传感器

在直缝、环形焊缝的自动焊接和焊接工位的自动转换，以及生产线的工件传输控制中广泛采用位置传感器。在直缝自动焊接中，在焊缝的两端采用两个位置传感器，来确定焊炬行走的位置，从而实现直缝的自动焊接。在焊接工位自动转换控制中，位置传感器固定在焊接机头上，焊件在装卸工件工位安装固定后，转盘带动焊件旋转，当传感器检测到定位块时，转盘停转，焊件到达焊接位

置。焊接时，在装卸工件工位进行焊件的更换，焊接完成后，再进行工位的转换。

1. 接触式位置传感器

在自动化焊接中，接触式传感器主要有两类应用：一是用于自动化焊接生产线上的大量的限位开关（行程开关）、微动开关；二是用于焊缝跟踪中的触杆接触式传感器。常见限位开关的结构形式如图 5-2-2 所示。

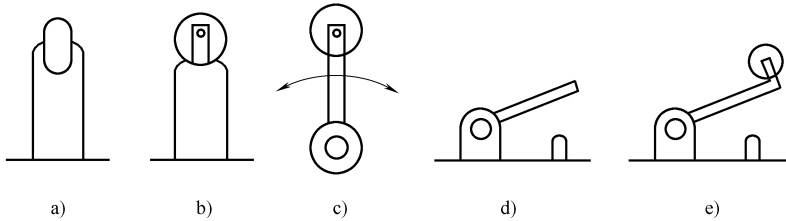


图 5-2-2 限位开关的结构形式

a) 撞针式 b) 滚轮撞针式 c) 滚轮摆杆式 d) 铰链杠杆式 e) 滚轮铰链杠杆式

如图 5-2-3 所示，一般的限位开关大多都具有一个以上的常开或常闭触头，也称为动合触头和动断触头，当物体与限位开关接触，压下开关时，限位开关的动断触头断开，动合触头闭合，当物体离开限位开关时，触头恢复常态。

2. 触杆接触式传感器

触杆接触式传感器是将触杆输出的距离信号转变成电信号，用于检测坡口形状，从而实现焊缝跟踪控制，可以进一步分为机械式和机械电子式。图 5-2-4 所示为机械触杆式传感器的结构形式，这类传感器靠对导杆形成的强制力来导向从而控制焊缝形状。图 5-2-5 所示为机械电子式传感器，这类传感器是通过电子装置发出信号，进行控制，实现自动跟踪。按机-电信号转换方式分为开关式、微分差动式和光电式。开关式是用微电装针式限位开关输出开/关信号，微分差动式由滑动铁心和变压器组成，输出与距离成正比的模拟信号，光电式是通过两个光电管接受发光二极管发出的光束，进行调节。

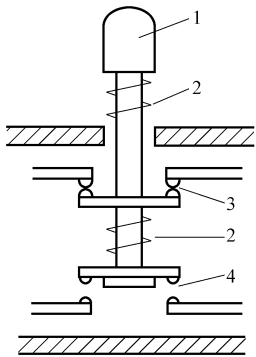


图 5-2-3 限位开关的内部结构

1—顶杆 2—弹簧 3—动断触头 4—动合触头

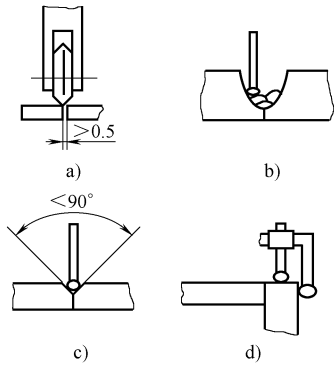


图 5-2-4 机械触杆式传感器的结构形式

a) 用导杆接触间隙 b) 用导杆以焊道与坡口交点为基准 c) 用导杆以坡口中心为基准 d) 用双导杆以焊件表面为基准

3. 电极接触式传感器

图 5-2-6 所示的电极接触式传感器主要用于机器人和自动焊接设备，在焊丝与母材接触时，检测焊接电流和电压，从而在机器人或自动焊接设备的坐标系中获取接触点位置的坐标，通常称为接

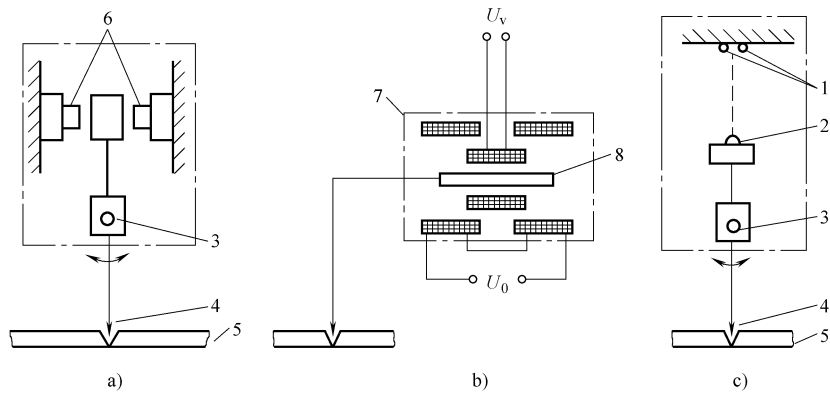


图 5-2-5 机械电子式传感器

a) 开关式 b) 微分差动式 c) 光电式

1—光电管 2—发光二极管 3—杠杆轴 4—跟踪探头 5—焊件 6—微动开关 7—位移传感器 8—铁心

触点传感器。通过焊丝的自动切断装置可预定伸出长度，也可与参考点比较来确定伸出长度。

2.1.3 霍尔式传感器

利用霍尔效应原理可以制成霍尔式接近开关、霍尔电流和电压传感器。霍尔效应的基本原理为：当有电流 I 流过时，电子运动速度 v 与 I 的方向相反，电子运动受到磁场作用使运动轨迹横向偏移，按图 5-2-7 中虚线方向前进。这导致了半导体片的一侧电子密集呈现负电荷，另一侧电子稀疏呈现正电荷，两侧面之间形成电场 E ，称为霍尔效应，由霍尔效应产生霍尔电势 E 。霍尔电势 E 的大小与控制电流 I 和磁通密度 B 的乘积成正比，一般控制电流 I 和内阻较小，其工作电压 $U \approx E$ ，即

$$E \approx U = KIB\sin\theta \tag{5-2-1}$$

霍尔元件是霍尔传感器的核心，采用的材料有锑化钢（InSb）、砷化钢（InAs）、砷化镓（GaAs）等。霍尔元件是在单晶薄片的两端焊上两根控制电流引线，在另外两端焊上两根霍尔电压输出引线，如图 5-2-8 所示。

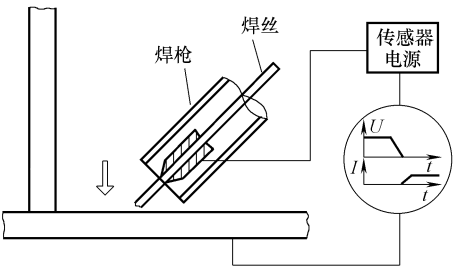


图 5-2-6 电极接触式传感器的工作原理图

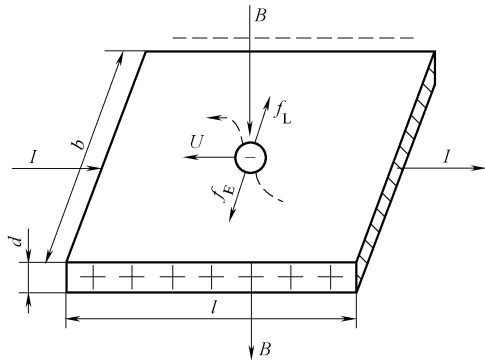


图 5-2-7 霍尔效应工作原理图

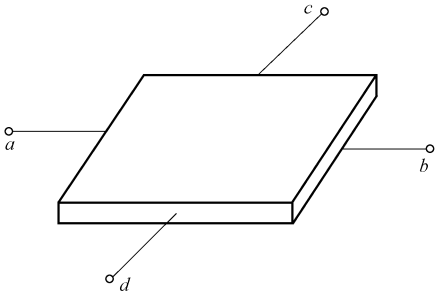


图 5-2-8 霍尔元件示意图

当半导体材料和尺寸确定后霍尔工作电压 U 与 I 、 B 的乘积成正比, 根据这一特性, 在恒定电流下可用来测量磁感应强度 B ; 反之, 在恒定的磁场下, 可以测量电流 I 。

霍尔式接近开关是利用霍尔效应而制成的一种磁敏传感器。这种传感器是利用霍尔效应与集成电路技术结合而制成的一种磁敏传感器, 它能感知与磁信息有关的物理量, 并以开关信号形式输出。采用霍尔式接近开关检测位置时, 通常将一磁铁安放在被检测的物体上, 而将传感器安放在固定位置, 当被检测物体运动靠近传感器时, 磁铁产生的磁场作用在传感器上, 霍尔元件输出电压, 经放大和施密特整形电路输出高电平。当被检测物体远离传感器时, 磁铁产生的磁场在霍尔元件中产生的电压很小, 施密特整形电路翻转输出低电平。霍尔开关集成传感器的内部结构如图 5-2-9 所示。

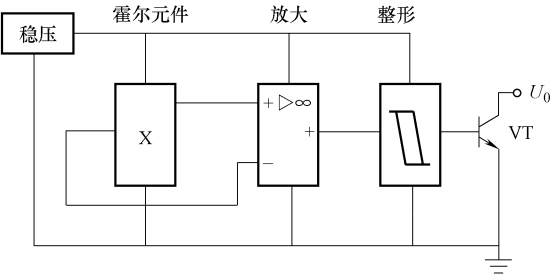


图 5-2-9 霍尔开关集成传感器的内部结构

霍尔电流传感器是按照安培定律原理做成, 即在载流导体周围产生一正比于该电流的磁场, 而霍尔器件则用来测量这一磁场。通过测量霍尔电势的大小来测量载流导体电流的大小, 因此电流传感器经过了电-磁-电的绝缘隔离转换。图 5-2-10 所示为霍尔电流传感器内部结构。由于磁路与霍尔器件的输出具有良好的线性关系, 因此霍尔器件输出电压信号 U_0 , 可以间接反映出被测电流 I_1 的大小。

图 5-2-11 所示为霍尔电压传感器原理图, 与电流传感器不同的是在测量电压时, 电压传感器的原边多匝绕组通过串联一个限流电阻 R_1 然后并联在被测电压 U_1 上, 得到与被测电压 U_1 成比例的电流 I_1 。

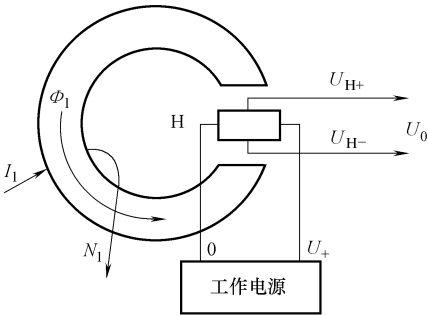


图 5-2-10 霍尔电流传感器内部结构图

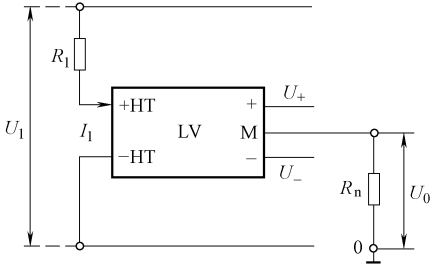


图 5-2-11 霍尔电压传感器原理图

霍尔电流和电压传感器由于具有很好的电气隔离性能, 广泛应用于焊接电源的电流和电压采样中, 这样可保证电源主电路与控制电路的良好隔离。霍尔电流和电压传感器的动态响应速度很快, 在电弧动态特性的测量中, 也采用这两种传感器进行瞬时电流和电压的测量。

2.1.4 电磁式传感器

电磁传感器按照频率分为普通频率式电磁传感器和高频式涡流传感器。电磁传感器的频率低于 10kHz, 涡流传感器的频率为 30 ~ 160kHz。其中涡流传感器的应用较为广泛, 下面以涡流传感器为例来分析其工作原理及应用。

图 5-2-12 所示为涡流引起的磁场变化的情况。当线圈中通过高频电流 i 时, 线圈周围产生高频磁场, 该磁场作用于金属体, 但由于趋肤效应, 不能透过具有一定厚度的金属体, 而仅作用于金属表面的薄层内。在交变磁场的作用下金属表面产生了感应电流 I_e , 即为涡流。感应电流也产生一个

交变磁场并反作用于线圈上，其方向与线圈原磁场方向相反。这两个磁场相互叠加，就改变了原来线圈的阻抗 Z ， Z 的变化仅与金属导体的电阻率 ρ 、磁导率 μ 、激励电磁强度 i 、频率 f 、线圈的几何形状以及线圈与金属导体之间的距离有关。当被测对象的材料一定时， ρ 、 μ 为常数，仪表中的 i 、 f 、 d 也为定值，于是 Z 就成为距离 d 的单值函数。

图 5-2-13 所示为电磁式接近开关进行物体位置检测的工作原理图，振荡器在接近开关的作用表面产生一个交变磁场。当被测物体接近表面时，由于涡流的作用，接近开关附近磁场发生变化，导致传感器的检测线圈的电感量发生变化，使振动减弱以致停振，因而根据接近开关输出信号的“有”、“无”，就可以确定有无被检测物体的存在。

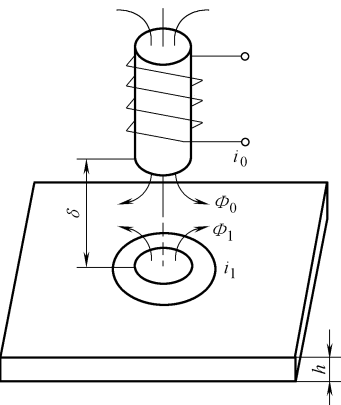


图 5-2-12 涡流引起的磁场变化

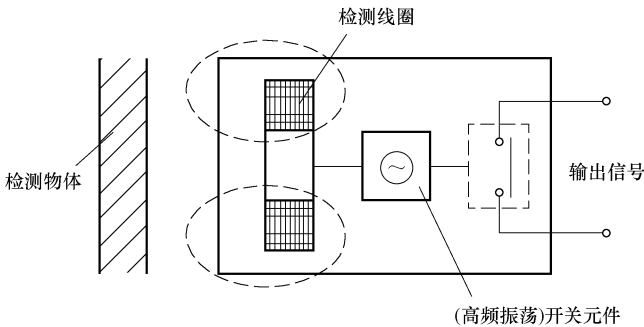


图 5-2-13 电磁式接近开关

2.1.5 光电式传感器

光电式传感器是指能够将可见光转换成某种电量的传感器。光电式传感器通常由光源、光学通路和光电元件三部分组成。光源是许多光电传感器的重要组成部分，要使光电传感器很好地工作，除了合理选用光电元件外，还必须配备合适的光源。常用光源有以下几种：发光二极管 LED 和激光二极管等。光敏二极管、光敏三极管、位置传感器（Position Sensitive Detector, PSD）等是最常见的受光器件。由光源、光学通路和光电器件组成的光电传感器在用于光电检测时，还必须配备适当的测量电路。测量电路能够把光电效应造成的光电元件电性能的变化转换成所需要的电压或电流，不同的光电元件所要求的测量电路也不相同。

光电式接近开关是由光源与受光器件组合而成的，它利用被检测物体对光的透射或反射，进行物体位置的检测。根据工作原理不同，光电式接近开关可分为反射型光电式接近开关和透射型光电式接近开关。图 5-2-14 所示为反射型光电式接近开关的工作原理。应用反射型光电传感器检测物体位置时，传感器中光源发出的光，经被测物体反射后到达受光器件上，受光器件就接收到光信号而产生一个电脉冲，表示到达了被测物体的检测位置。透射型光电式接近开关的工作原理与此类似。

光电式接近开关的体积

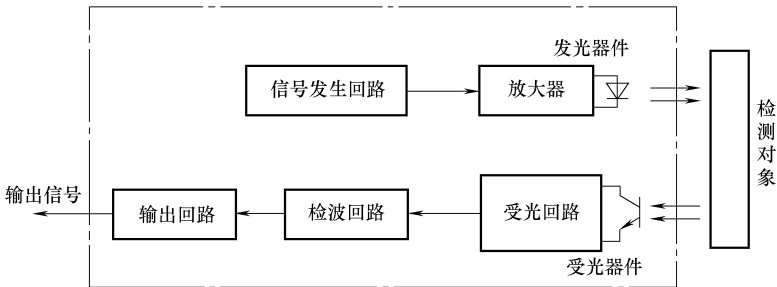


图 5-2-14 反射型光电式接近开关的工作原理

小、可靠性高、检测位置精度高、响应速度快、易与 TTL 电平电路兼容，在焊接自动化中的应用非常广泛。

2.1.6 光学传感器

光学传感器用可视光和激光进行测量，有多种类型，包括：光学图像传感器、透射型光学传感器、光学测量传感器、光学鼠标传感器、反射型光学传感器等。

电荷耦合器件（Charge Coupled Device, CCD）光学图像传感器按照接收光的模式分为点阵、线阵和面阵图像传感器。CCD 图像传感器使用一种高感光度的半导体材料制成，能把光线转变成电荷，通过模数转换器芯片转换成数字信号，因而可以轻而易举地把数据传输给计算机。CCD 由许多感光单位组成，通常以百万像素为单位。当 CCD 表面受到光线照射时，每个感光单位会将电荷反映在组件上，所有的感光单位所产生的信号加在一起，就构成了一幅完整的画面。

面阵 CCD 摄像机是二维图像的常规感光器件，在焊接自动化中主要用于焊缝跟踪和熔透控制中。焊接机器人视觉系统就是采用 CCD 图像传感器组成的焊缝图像信息传感系统，该系统将获取的焊缝图像信息进行识别处理得到焊接电弧与焊缝偏差量和偏离方向等信息，然后根据这些信息去控制机器人调节焊枪与焊缝的相对位置，以便消除电弧与焊缝的偏离。

2.1.7 电弧传感器

在开坡口和角焊缝等情况下，通过摆动或旋转电弧所引起电弧电流或电压的变化，就可以得到电弧中心是否偏离焊缝中心线的信息。在等速送丝恒压外特性的 MIG/MAG/CO₂ 气体保护焊中，通过检测电弧电流的变化来获得偏离信号，在陡降外特性的 TIG 焊等工艺系统中，则是检测电弧电压的变化。也可通过检测焊接电流、电弧电压和焊接速度来计算焊枪的高度。电弧传感器的检测原理如图 5-2-15 所示。

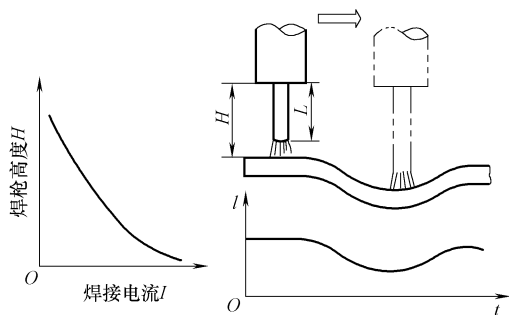


图 5-2-15 电弧传感器的检测原理

在 V 形坡口对接焊时，利用焊枪作横向摆动，由左右两边伸出长度的变化情况，可以求出焊缝左右和高低的跟踪信号。图 5-2-16 所示为焊枪对中情况示意图，在焊枪与坡口中心对中时，焊枪摆到左右两边的伸出长度相等，则 $I_L = I_R$ ；当焊枪偏左时，则 $I_L > I_R$ ；当焊枪偏右时，则 $I_L < I_R$ 。利用 I_L 、 I_R 之和可判断焊枪的高低位置，若 $I_L + I_R = I_G$ （ I_G 为给定值），焊枪位置适中；如果 $I_L + I_R > I_G$ ，焊枪位置偏低；如果 $I_L + I_R < I_G$ ，焊枪位置偏高。

摆动扫描电弧传感器的横向摆动是靠机械机构来实现的，摆动频率受到机械机构的限制，一般都在 10Hz 以下，摆动幅度为 2 ~ 10mm。

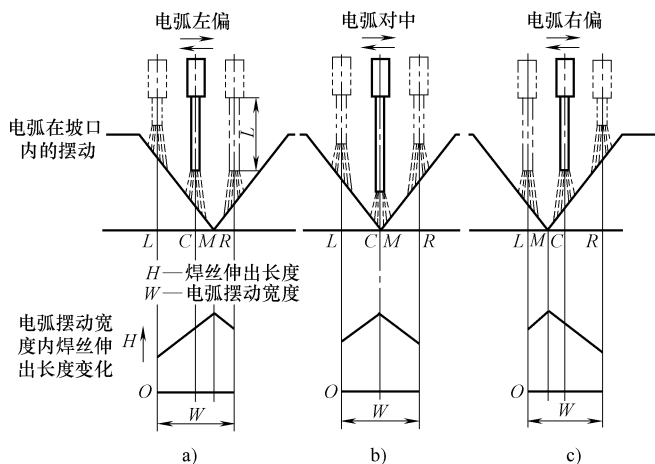


图 5-2-16 焊枪对中情况示意图

a) 偏左 b) 对中 c) 偏右

旋转电弧传感器的工作原理与摆动电弧传感器的工作原理基本相同,由于旋转机构容易实现较高速度的旋转运动,所以旋转电弧传感器的频率可以达到 10 ~ 100Hz。

电弧传感器焊缝跟踪的特点如下:

- 1) 电弧自身就是传感器,使得焊枪结构简单紧凑,焊接可达性好。
- 2) 电弧偏差信息获取速度快,可进行实时焊缝跟踪控制。
- 3) 不受弧光、电弧热、磁场、飞溅、变形等因素的干扰。
- 4) 可适应的焊接接头有 V 形坡口焊缝、角焊缝、船形焊缝、搭接焊缝等,跟踪精度为 0.2 ~ 1mm。

2.1.8 红外热像传感器

红外产品种类繁多,包括红外热像、红外摄像、红外通信、红外光谱仪、红外传感器等。焊接过程中熔池表面温度场伴随着红外辐射,采用红外辐射测温可以实时地检测熔池及周围金属的表面温度场。红外热像采集系统由一个红外线扫描 CCD 摄像机和计算机图像处理系统构成。红外摄像机安装在焊接机头上,为使摄像机避开电弧的直接热辐射,熔池及周围金属的表面温度场是通过一个光学反射镜进入到水平放置在焊枪上方的摄像机中的。反射镜采集电弧行走前方的金属表面温度场。

为了限制焊接电弧光对红外热图像拍摄时的干扰,红外热像 CCD 的红外敏感检测器是由特殊的光伏电池组成,这种光伏电池只对 8 ~ 12 μm 谱段的红外线敏感,而对强弧光谱段不敏感,这种摄像系统可显著减弱弧光的干扰。每秒可采集 30 幅热像图供计算机处理分析。经过计算机图像处理,得到一幅熔池及周围金属表面温度热像图。在热像图上电弧偏离与正对焊缝的热像图有明显的不同。采用一定方法对热像图的有关数据进行分析,可获得电弧是否偏离、偏离方向及偏离量等信息。利用这些信息可通过控制执行机构对电弧位置进行调节,直到电弧正对焊缝为止。

2.1.9 超声波传感器

超声波传感器是利用超声波的特性研制而成的传感器。超声波传感器可分为整体式和分离式,具有独立完成发射和接收超声波的功能。

超声波是一种振动频率高于声波的机械波,由换能晶片在电压的激励下发生振动而产生,它具有频率高、波长短、绕射现象小,特别是方向性好,能成为射线而定向传播等特点。超声波对液体、固体的穿透能力很强,尤其是在不透明的固体中,它可穿透几十米的深度。超声波碰到杂质或分界面会产生显著反射形成反射回波,碰到活动物体能产生多普勒效应。

超声波传感器可分为接触式和非接触式。接触式超声波传感器利用超声波在金属内传播时的界面反射现象,由探头接收反射波脉冲;由入射—反射波脉冲的行程,测得界面位置。当探头离钢板接缝边缘的位置发生左右变化时,接收到的反射波脉冲时间就要发生变化,当焊枪偏离平衡位置时,其获得的声程与平衡位置时的标准声程之差为左右跟踪的信号。一般采用横波探头作为焊缝跟踪传感器(见图 5-2-17)。

非接触式超声波传感器通过气体介质传播超声波,采用纵波形式,由于超声波在气体介质中传播损耗大,所以必须加入匹配层进行声、电匹配,利用聚焦超声透镜技术提高空气超声波传播器的灵敏度。目前,空气超声波传感器已应用于二氧化碳气体保护焊和埋弧焊。

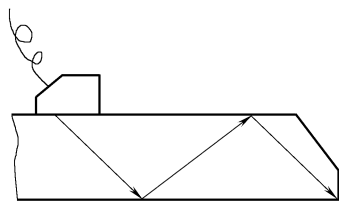


图 5-2-17 焊缝跟踪的横波探头

2.1.10 其他传感器

在焊接自动化中，还经常用到光栅尺、光电编码器、测速发电机等传感器。

1. 光栅尺

光栅尺是用于检测直线运动物体位移和速度的传感器。它的结构如图 5-2-18a 所示。它由移动光栅、固定光栅、光源和受光元件组成。

在检测位移时，光源通过在光栅尺上按固定间隔排列的栅缝，断续地将光照射到对面的光敏二极管上，光敏二极管上将产生相应的脉冲信号，通过对光敏二极管产生的脉冲信号进行计数，可以检测物体移动的距离。

测量速度时，一般采用增量方式，即通过固定时间内对光敏二极管产生的脉冲信号进行计数来测量物体移动的速度。

通过在固定光栅板上配置两个能产生 1/4 间距相位差的栅缝，可得到两相脉冲输出信号，如图 5-2-18 所示。通过对其相位差的检测，可以检测物体的移动方向。

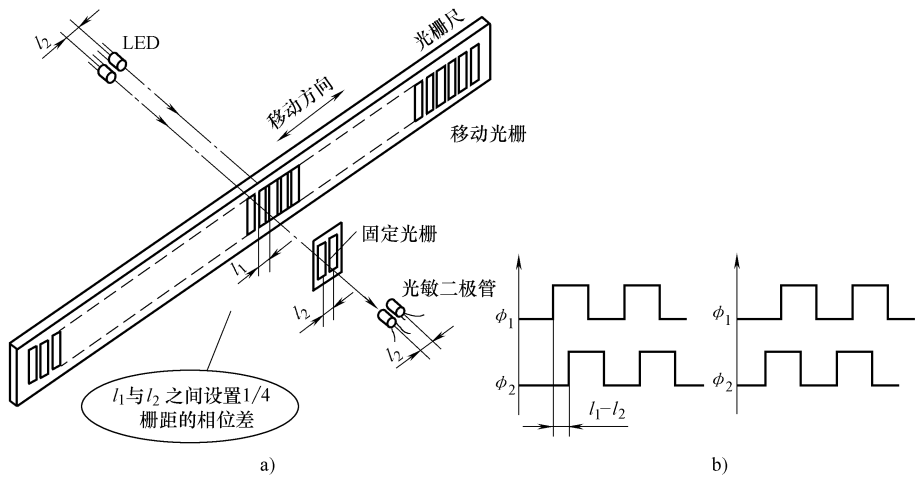


图 5-2-18 光栅尺的结构及测量原理
a) 位移量检测 b) 位移方向检测

2. 光电编码器

绝对编码器的结构如图 5-2-19 所示。编码器由光源、光电器件、固定光栅和活动光栅盘组成。光源和光电器件采用发光二极管。光栅盘是圆形的，有若干个同心圆环区间。

增量编码器又称为脉冲盘式数字传感器或脉冲盘式编码器。该编码器的动光栅盘与光栅尺相类似，只是变为圆形和旋转运动。动光栅盘又称为脉冲盘，只有一条黑白相间的码道。当光源射出的平行光照射在码盘的透光区时，光通过透光区，再通过固定光栅照射到光敏二极管上，光敏二极管输出高电平信号（“1”）；当光照射在码盘上的不透光区时，光被隔离，光敏二极管上不受光，输出低电平（“0”），从而形成一组光、电脉冲信号。通过计量增量编码器输出的脉冲数，可以检测旋转物体的旋转角度、速度和位移。

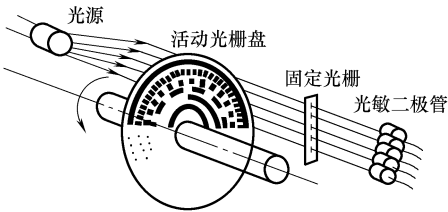


图 5-2-19 绝对编码器的结构

3. 测速发电机

测速发电机是一种将机械转速变换为与转速成正比的电压信号的传感器。交流测速发电机有同步和异步之分。直流测速发电机可分为电磁式和永磁式两种。永磁式直流测速发电机的工作原理如图 5-2-20a 所示。永磁式直流测速发电机的定子产生恒定磁场，当转子在磁场中旋转时，电枢线圈中产生交变电动势，经换向器和电刷转换成与转子速度成正比的直流电动势。

直流测速发电机的输出曲线如图 5-2-20b 所示。

当负载电阻 R_L 趋于无穷大时，其输出电压 U_o 与转速 n 成正比。随着负载电阻 R_L 变小，输出电压下降，而且输出电压与转速之间并不能严格保持线性关系。

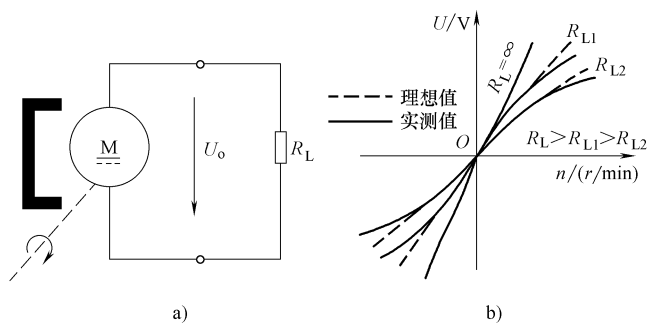


图 5-2-20 永磁式直流测速发电机的工作原理

a) 电路原理图 b) 输出特性曲线

2.2 焊接过程的信号检测

当今制造业趋于全球化、网络化、集成化、虚拟化、异地化、数字化，计算机与信息技术的快速发展将促进制造领域逐渐与其融合，焊接作为制造领域中重要的材料加工和结构生产力，也正在与信息技术紧密结合，由于焊接过程的多变性和复杂性，利用数字化技术，使焊接设备从简单的机电产品变成一种精密加工仪器，将是焊接设备发展的方向。随着焊接自动化技术的飞速发展，传感技术在焊接过程中得到了广泛应用。如焊接过程中焊接质量的监控、焊接生产过程的自动化都需要检测焊接过程的相关参数，并据此来进行自动控制。

由于传感器位于测控系统的第一级，用于从被测对象中获取测量的信息，并转换为测量系统能够处理的信号。对于一个测控系统，要选择适用于测量任务的传感器种类，信息传递的方式，传感器的大小和尺寸，配置方式和同系统各部分的协调关系，只有解决了这些问题才能形成好的测控系统。在焊接过程中，由于所受到的干扰因素多，而且焊接质量和焊接参数之间的关系一般是非线性的复杂关系，所以准确检测焊接过程参数，并建立精确的焊接过程质量的数学模型关系十分重要。

2.2.1 焊接过程的电参数检测

焊接过程传感信号通常以电信号方式输出，电信号首先经过模拟电路进行预处理，然后经过数模转换为数字信号，再由微处理器或计算机系统加以监测和控制。模拟信号是一个连续的时间函数，设为 $f(t)$ ，由于微机只能接受离散的数字量，因而要对连续信号 $f(t)$ 采样。采样就是周期性地获取 $f(t)$ 的瞬时值，设采样周期为 T ，经采样后信号就变成在时间上离散的信号 $f(nT)$ 变化，如图 5-2-21a、b 所示。显然，采样周期越小，采样获得的信号与原始信号越近似，但采样周期越小，采样获得的数据将越多。如何采样才能不丢失信息，即采样后的离散信号能基本上反映原来的连续信号，这就要遵循如下采样定理：对信号采样时，采样频率必须至少大于等于信号最高频率的 2 倍，实用时均高于 2 倍。对于混在信号中的无用高频信号，采样前先用低通滤波器滤掉，否则就会使采样后的信号发生畸变。采样频率 f_s 定义为采样周期 T 的倒数，即 $f_s = 1/T$ 。

传感器输出的电信号一般是较为微弱，需要一些模拟电子电路加以处理和放大，以满足检测显示和控制的需要。常见的信号检测和处理电路包括信号放大电路、信号运算电路、信号分离电路和

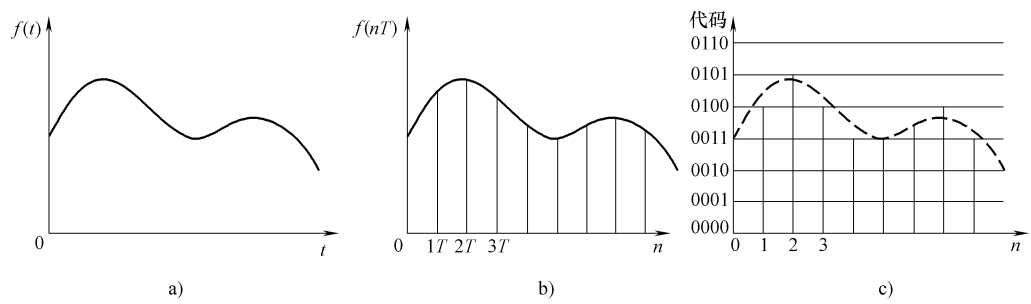


图 5-2-21 模拟连续信号的采样和量化

a) 连续信号 b) 时间离散采样信号 c) 量化后的数字信号

信号转换电路。

1. 信号放大电路

随着微电子技术的发展，一方面运算放大器的性能在不断提高，新型的运算放大器不断出现；另一方面，各种运算放大器或其他专用放大器具有集成度高、不需要或很少需要外围器件、方便使用等特点。如高输入阻抗的运算放大器 AD549，这是美国 ADI 公司推出的具有极低输入偏置电流的单片电路静电计型运算放大器。Linear Technology 公司推出了具有数字增益控制的精密仪表放大器 LTC2915，通过并行或串行接口可将增益编程为 0、1、2、4、8、16、32、64、128、256、512、1024、2048 或 4096。美国 Lattice 公司推出了在系统可编程模拟电路 ispPAC10/20/30/80/81 等，在系统可编程模拟器件允许设计者使用开发软件在计算机中设计、修改模拟电路，进行电路特性模

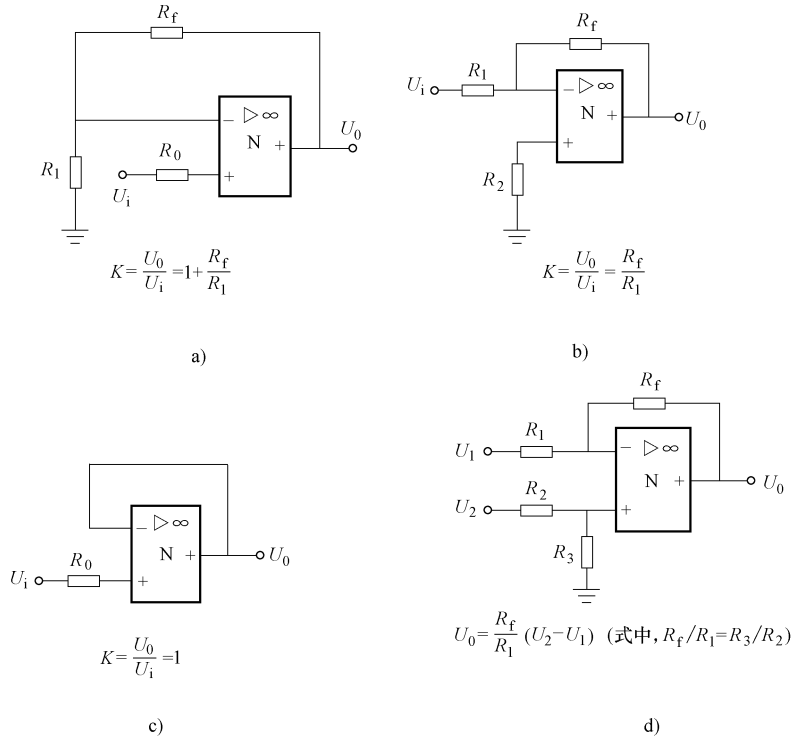


图 5-2-22 常见的放大电路

a) 同相比例放大电路 b) 反相比例放大电路 c) 电压跟随器电路 d) 差动放大电路

拟，最后通过编程电缆将设计方案下载到芯片中。

通常可以采用的信号放大单元电路包括同相比例放大电路、反相比例放大电路、电压跟随器电路和差动放大电路，电路结构如图 5-2-22 所示。

2. 信号运算电路

信号运算电路包括加减法运算电路、微分电路和积分电路等几种运算电路，如图 5-2-23 所示。

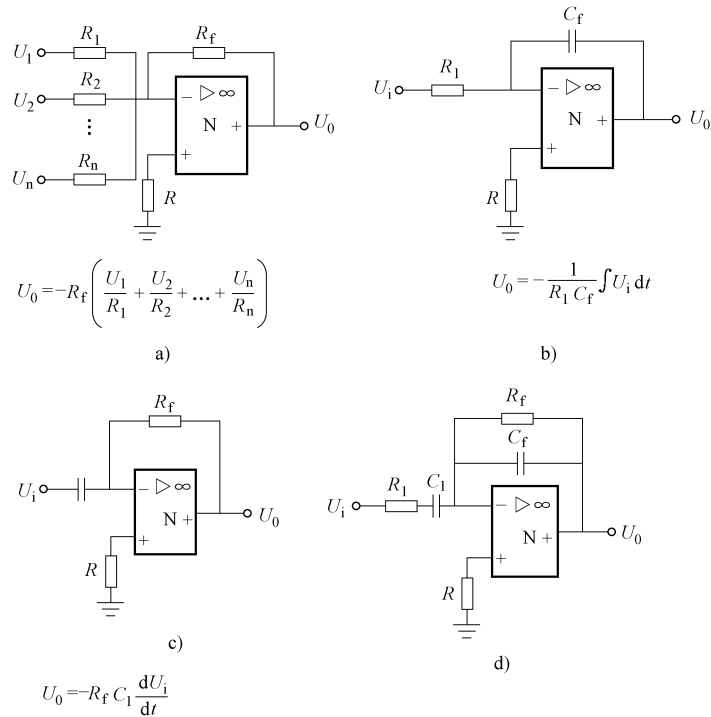


图 5-2-23 运算电路原理图

a) 加法运算电路 b) 积分电路 c) 基本微分电路 d) 实用微分电路

3. 信号分离电路

在传感器检测的信号中，通常包含一些噪声或与被测量无关的信号，在信号的传输、放大、变换等信号处理中也会混入不同的噪声。因此必须采取滤波器对噪声加以抑制。滤波器实际上是一种选频装置，其功能就是让指定频段的信号能够比较顺利地通过，而对其他频段信号起衰减作用。根据滤波器的选频作用，一般将滤波器分为低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器四类，其幅频特性如图 5-2-24 所示。

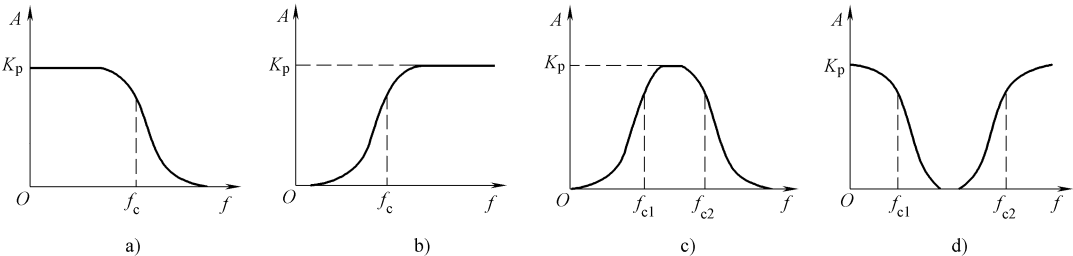


图 5-2-24 四种滤波器的幅频特性

a) 低通滤波器 b) 高通滤波器 c) 带通滤波器 d) 带阻滤波器

按照滤波器元件类型可分为 RC 滤波器、LC 滤波器或晶体管滤波器，根据滤波器的电路性质可分为有源滤波器和无源滤波器，根据滤波器的信号性质可分为模拟滤波器和数字滤波器。无源 RC 滤波器如图 5-2-25 所示，有源滤波器如图 5-2-26 所示。

无源 RC 滤波器与同相、反相放大器和跟随器组合可构成有源滤波器，如低通 RC 滤波器与同相放大器组合可构成具有同相放大作用的低通滤波器，与电压跟随器组合可构成带电压跟随器的低通滤波器，与反相放大器组合可构成具有反相输入的低通滤波器。同样高通滤波器也可与上述的放大器组合构成相应的有源高通滤波器。两个低通 RC 滤波器串联后与放大器组合可构成二阶有源滤波器。

4. 信号转换电路

传感器输出的电量形式有电阻、电感、电容、电流、电压、频率以及相位等多种形式，在焊接自动化系统中，通常需要对传感器输出的信号进行转换，以便达到系统控制所要求的信号，这就需要信号转换电路。信号转换电路包括电压比较器、电压/频率转换电路、模拟开关电路，模/数（A/D）转换电路、数/模（D/A）转换电路等。

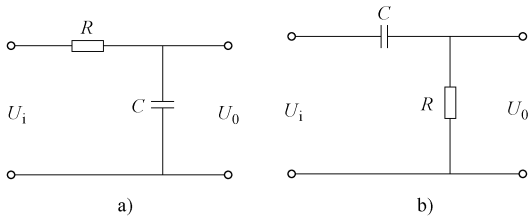


图 5-2-25 无源 RC 滤波器
a) RC 低通滤波器 b) RC 高通滤波器

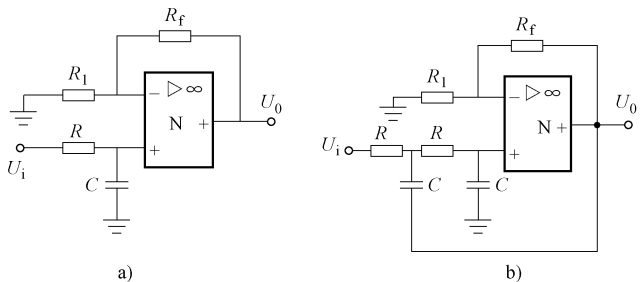


图 5-2-26 有源滤波器
a) 一阶有源滤波器 b) 二阶低通滤波器

2.2.2 焊接过程的视觉检测及信号处理

焊接过程视觉检测及信号处理目前主要用于焊缝自动跟踪控制，基于视觉的焊缝跟踪控制系统设计的总体思路为：利用面阵 CCD 传感器采集弧焊过程的原始图像，将传感器采集的图像信号利用高分辨率的 A/D 转换器件转换成数字量；在 Windows 操作系统下，利用 C++ 编程工具，先将采集到的图像信号经过预处理和滤波处理，提取焊接图像信号中的边缘信息，然后通过识别找出焊缝中心点位置，得到焊枪偏差控制量，将该控制量送到自动行走机构或机器人，采用 PID 等控制算法实现反馈控制。

采用条形激光视觉传感器进行焊缝跟踪的原理图，如图 5-2-27 所示。激光光源和焊枪固定在机器人的手腕上，使条形激光的中点对应焊接电弧的位置，同时也对应焊接接头中心位置。若焊接电弧与焊接接头中心产生偏离，根据激光图形可以得到电弧与焊缝中心线的偏离方向和偏差量大小等信息，根据这些信息，控制器及执行机构实时调节电弧与焊缝的相对位置以便消除偏离。

根据焊缝跟踪控制系统的功能要求，焊缝跟踪软件一般采用面向对象的设计思想，进行模块化的程序设计。整个系统按功能划分可分为运动机构的上电初始检测、CCD 视觉传感器采集图像、图像预处理、边缘检测、特征点提取、偏差检测、

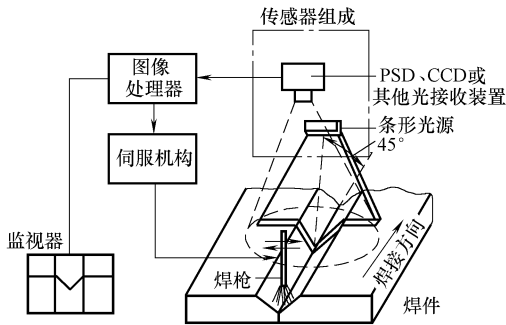


图 5-2-27 视觉传感器焊缝跟踪控制系统原理图

系统控制以及结果回显等功能模块，焊缝跟踪控制系统总体流程框图如图 5-2-28 所示。

初始检测模块主要完成运动机构的初始化以及跟踪起始点坐标定位、焊接距离设定、跟踪速度设定等，该部分是完成焊缝跟踪任务的基础。

焊缝跟踪系统开始加电检测完成后，进入图像采集模块。在开始采集图像前，要先确定采集图像的起始点，因为在 CCD 视觉传感器镜头前加装了滤光片之后，采集的图像在没有焊接弧光照亮时是漆黑一片，所以起始点的选择要在上滤光片之前完成。焊接时借助强烈弧光照亮焊枪行走方向前端的一段焊缝，CCD 视觉传感器就可以采集到比较清晰的图像。

图像经过预处理后进入边缘检测模块，检测出焊缝和熔池边缘点，得出边缘特征点的位置坐标和焊缝中心点的位置坐标，并计算焊缝中心点与前一幅图中得到的基准点的偏差值，控制部分可采用 PID 等控制算法。

软件系统还有一些辅助分析功能，如焊接过程采集图像的回显，焊缝模拟跟踪基准确定等。这些功能可以得到实际的焊接曲线和焊接过程中的偏差检测情况，对这些结果进行分析就可以方便地发现跟踪过程中的问题，以便在下次跟踪中避免同样的问题再次出现。

2.2.3 焊接过程的质量信号检测

焊接过程质量控制系统的总体设计思路为：利用 CCD 摄像机采集弧焊过程的原始熔池图像，将原始图像经传感器利用高分辨率的图像采集卡将图像信号转换为数字量；在 Windows 操作系统下，利用图像处理软件进行预处理和图像分割，提取熔池边缘，得到熔池的熔宽和面积等信息；再将这些被控信息送入熔透控制系统中，采用参数自调整模糊 PID 算法进行反馈控制；最后将数字控制量通过数据采集卡中的 D/A 接口转换成模拟信号输出，控制焊接电流，以实现弧焊过程的熔透自动控制。弧焊过程熔透控制系统的原理如图 5-2-29 所示。

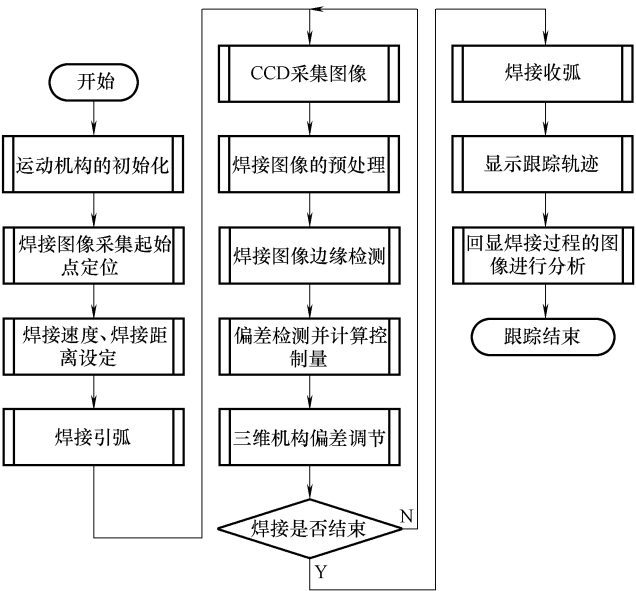


图 5-2-28 焊缝跟踪控制系统总体流程框图

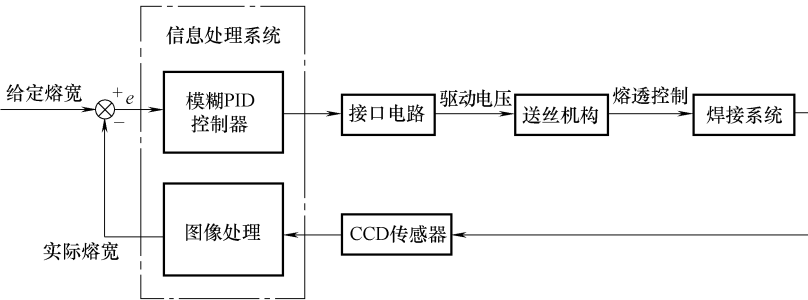


图 5-2-29 弧焊过程熔透控制系统原理图

弧焊过程熔透控制硬件系统的设计方法是在计算机总线上插上一块图像数据采集卡，CCD 传感器经专用电缆与机内图像采集卡连接，图像采集卡由微机电源供电来完成图像数据的采集，在经过一系列的数据处理后，工控机一方面与驱动控制器进行通信，通过机械手控制焊枪的方向、位移和速度；另一方面与数据采集卡进行通信，控制焊接电流。弧焊过程图像分析系统的硬件原理结构如图 5-2-30 所示。

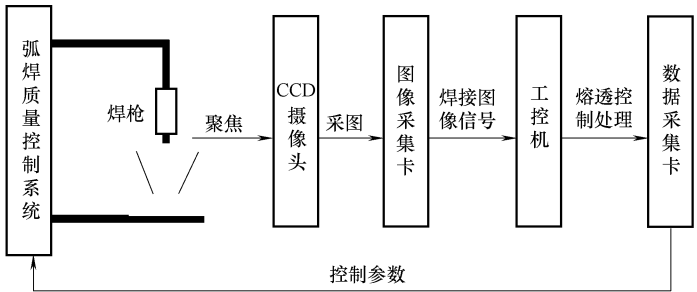


图 5-2-30 系统硬件原理图

在实际试验中是把 CCD 视觉传感器和焊枪刚性连接在一起，且 CCD 视觉传感器是以与焊缝大约成 45° 的角度拍摄。根据焊枪行走方向，在焊接过程中采集到的图像可以是焊缝前端熔池图像

像，也可以是焊缝后端熔池图像。在试验中采取的方式是在焊接方向前端采集图像。这样采集的熔池图像比较清晰而且不会受到已熔化区域的影响。由于 CCD 视觉传感器是从焊枪前上方俯视熔池，这样采集的图像难免有畸变，这个畸变量会引起图像失真，熔池形状会发生扭曲，在熔池检测时就会造成一个额外的偏移量，不过这个偏移量是系统静态误差，可以通过试验找出这个偏移量，并在后续控制中预加一个反向控制量予以消除。

由于焊接过程中的辐射和电弧光强烈，因此在弧焊过程中仅用 CCD 视觉传感器所看到的不仅仅是熔池，还有强烈的背景弧光，有时若是弧光严重的话，甚至连熔池都看不清楚，这时机器视觉所采集到的信息就只有电弧光而已。在无外加辅助光源的情况下，采用峰值波长为 $6329 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) 的干涉滤光片，该滤光片的峰值透光率高达 63%，但对通带外的光波衰减极为严重。这样，即使是没有外加辅助光源，剩余的弧光不仅不会影响焊缝熔池的信息采集，还可变为积极因素作为光源，使熔化区和其他区域清晰地区分开来，在 CCD 传感器所拍摄的照片中即可清晰地看到焊接熔池。

弧焊过程熔透控制系统的功能包括图像数据采集、图像数据存储、图像的预处理、提取图像边缘、检测偏差量、偏差调节和模糊 PID 控制算法等主要功能以及焊接过程图像回显等辅助分析功能。为了便于功能的拓展，本系统采用了模块化程序设计思想，在总体方案确定后，

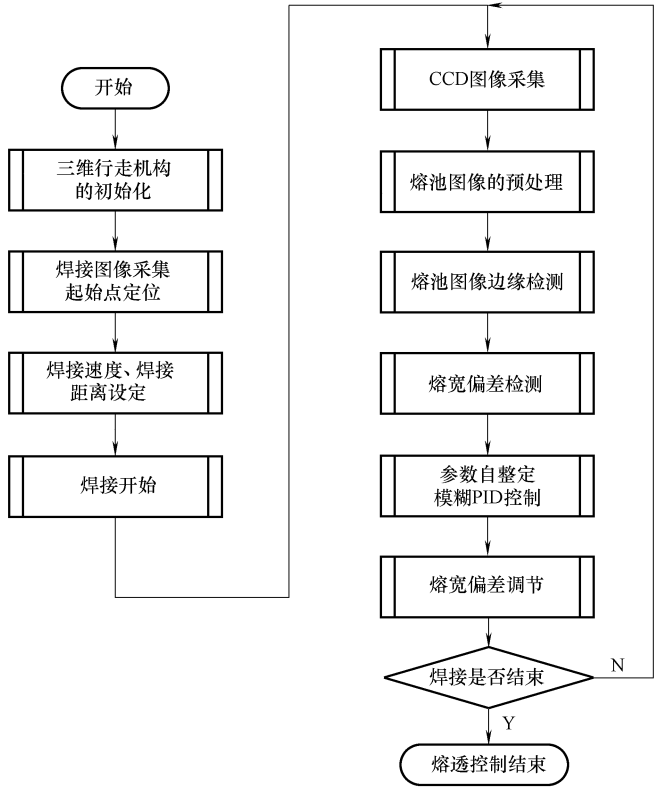


图 5-2-31 软件系统总体程序流程框图

根据所需的不同功能,分别组建各功能模块。

根据弧焊熔透控制系统的功能要求,应用 Visual C. net 编程系统实现的软件程序,采用面向对象的设计思想,进行了模块化的程序设计。系统在完成硬件检测、系统初始化、起始点定位以及初始参数设定后,即可起动熔透控制功能。整个系统按功能可划分为三维行走机构的加电初始检测、CCD 视觉传感器采集图像、图像预处理、熔池边缘检测、熔池特征信息提取、偏差检测、系统控制以及结果回显等功能模块。软件系统总体程序流程框图如图 5-2-31 所示。

(1) 初始检测模块 主要完成运动机构的初始化,以及图像采集起始点坐标定位、焊接距离设定、焊接速度设定以及对系统参数的设定等功能。它是完成熔透控制任务的基础。

(2) CCD 采集图像及图像预处理 选择 CCIR 制式的图像标准,采集速度为 25 帧/s,实验证明这样的采集速度已经能够满足熔透控制的精度,而且在模拟实验时有非常好的稳定性。图像采集完成后,将图像数据存到预先开辟的专用内存区域中,因为图像处理对内存容量要求很高,所以采用了一些特殊的内存管理技术来减缓这种压力。

弧焊过程中有很多时候弧光的变化都非常剧烈,飞溅也很严重,图像上有很多飞溅造成的孤立的噪声点和弧光不稳造成的晕光等,所以有必要对采集到的图像进行预处理。除了采用传统的中值滤波滤除孤立的噪声点外,还采用了数学形态学滤波,其中,自乘法滤除晕光效果非常好,另外灰度阈值分割对后续的二值形态学运算也是非常必要的。

(3) 边缘检测模块及熔宽偏差测量 利用二值形态学和灰度形态学算法提取出熔池边缘后,接下来进行熔宽和熔池面积的计算,将熔池宽度与基准值的偏差值作为被控量送往系统控制器。

(4) 控制算法及偏差调节根据本系统的特点,控制模块采用自整定参数模糊 PID 控制算法,即以系统的偏差和偏差变化率作为控制器的输入,运用模糊逻辑的控制规则对 PID 算法进行在线的自适应整定,以达到更佳的控制效果。

2.4 焊接过程故障诊断技术

焊接过程由于其工艺影响因素多而复杂,其出现故障的几率高、类型多。而焊接用的核心设备电焊机也不同于家电,大多都处在比较差的环境下工作,因此从客观上讲,电焊机在使用过程中出现一些故障是在所难免的。究其产生故障的原因,从维修的角度看不外乎以下三种,即内部原因、外部原因、人为原因。从发展的趋势看,通常采用的焊接设备主要包括晶闸管整流式和逆变式,焊接工艺也主要为气体保护焊、埋弧焊、TIG 焊、脉冲 MIG 焊,焊接过程主要为半自动焊、专机和机器人自动焊等。本小节主要从以上几个方面对焊接过程及设备的故障机诊断技术加以分析。

2.4.1 弧焊设备与焊接过程的故障诊断

在工业级的自动弧焊设备中,一般由弧焊电源、送丝机构、焊炬/焊枪、送气管路等弧焊系统、行走操作机构(焊车、龙门式行走机构等)或机器人本体和相同控制、通信接口组成自动弧焊设备或弧焊机器人。

造成弧焊系统、设备故障的内部原因主要有以下几种:

- 1) 主控板上的元器件损坏。
- 2) 功率模块损坏。
- 3) 接触器、控制变压器损坏。
- 4) 主变压器、电抗器等器件损坏。
- 5) 电流互感器损坏。
- 6) 输入组件损坏。

造成弧焊系统、设备故障的外部原因主要有以下几种：

- 1) 外电压波动较大，其波动范围超过了焊机正常工作所允许电压范围（ $380 \pm 10\%$ ）V。
- 2) 送丝机控制电缆损伤。
- 3) 输入、输出电缆连接不牢固。
- 4) 环境条件恶劣（露天无防护措施使用，在粉尘、油烟较大或有腐蚀性气体场所使用）。
- 5) 动物（蛇、老鼠等）进入机内。
- 6) 其他金属异物进入机内。

造成弧焊系统、设备故障的人为原因主要有以下几种：

- 1) 运输中损坏（特别是流动作业的用户经常搬运电焊机）。
- 2) 使用、保养不当（如用手拽电缆的方式移动送丝机，导电嘴没拧紧等）。
- 3) 修理中主控板上的电位器调乱，或将熔断器插错位置。

故障诊断的程序如下：

1) 调整送丝机遥控盒上的两个电位器，观察弧焊系统的空载电压和送丝机的转速，根据弧焊系统的空载电压和送丝机的转速是否受调确认故障现象。

- 2) 根据故障现象推断故障所在的范围。
- 3) 通过分析、检查、测试等手段找出故障点。
- 4) 用合格的部件更换损坏品或用其他手段排除故障。

弧焊设备维护的目的是迅速准确地排除故障，尽快使其投入正常使用。但在检修时若不谨慎从事，很可能会造成二次故障，或使简单故障复杂化，所以在检修过程中应注意以下事项：

- 1) 动手前先根据故障现象进行分析，确有把握时再给焊机通电。
- 2) 发现主控板上的元器件有明显的损坏时，在未查出原因并排除之前，不能只换上好的主控板或熔断器就立即通电试机。
- 3) 在通电检查时如发现焊机冒烟、打火、异味、异常过热等现象时应立即关机。
- 4) 主控板上的电位器不要随便调整。
- 5) 更换接触器、SCR 模块、控制变压器时注意原接线位置不要接错。
- 6) 不同机型的主控板不能互换。

近几年由于逆变技术的成熟及相关设备的可靠性大幅度的提高，逆变式弧焊电源因其体积小、重量轻和高效节能等明显的优势，已经被国内的广大用户所接受。逆变式弧焊设备由于主要采用的是电力电子器件，具有良好的动态响应性能，但在恶劣的实用环境下出现故障的概率更高一些，维护的技术要求也更高。

在进行逆变式 CO_2 弧焊设备维护前应注意以下几点：

- 1) 弧焊系统前面板各开关位置是否正确，面板元件是否损害。
- 2) 三相电源的电压是否在 $340 \sim 420\text{V}$ 范围内，是否有缺相。
- 3) 弧焊电源输入电缆的连接是否正确可靠。
- 4) 弧焊系统接地线是否正确可靠。
- 5) 焊接电缆是否正确，接触是否良好，电缆是否破损。
- 6) 气路是否良好， CO_2 气体调节器是否正常。

在焊接过程中经常碰到供气、送丝和电弧不稳等问题，应针对不同情况分别加以解决。

(1) 供气问题 可以从源头气瓶查起，检查是否有气；查看流量计压力，检查流量计是否损坏；查看气管是否堵塞或漏气，检查电磁阀是否有动作；焊枪是否有漏气的地方。

(2) 送丝问题 丝盘是否受阻；送丝轮是否合适；压丝轮压力是否合适；送丝软管是否堵塞、有硬弯；导电嘴孔径是否匹配，是否磨损；焊丝是否弯曲等。此外，还有控制部分的问题，如控制

电缆是否接触不良、断线,控制板送丝电路是否出现问题,焊枪开关是否损坏,送丝电动机是否损坏,电流调节电位器是否损坏等。

(3) 缺相现象 其中包括以下方面:

1) 如果电源变压器所接的两相缺相,弧焊系统不工作,无显示,工作指示灯不亮。这种情况需要检查电网电压、配电柜开关、刀开关、保险丝、空气开关等。

2) 如果缺另外一相,弧焊系统显示正常,空载工作正常,但是焊接过程电流会不稳定、断弧,不能正常焊接(排除控板、电位器等其他因素)。对于缺相现象,通常检查的是空气开关连接输入电缆处电压是否缺相,这种检查是不完全的。因为弧焊电源的空气开关和三相整流模块也有可能造成焊机内部缺相。如果经检查,弧焊电源空气开关(或输入接线盒)连接输入电缆处电压不缺相,应该再检查三相整流模块输出直流电压在工作时(即带负载)是否是直流 500V 左右。正常输入交流 380V 的情况下(不缺相),此电压应该为直流 510V 左右;在输入交流 340~420V 的情况下,此电压应该为直流 460~567V(带负载工作,不缺相)。如果焊机上的空气开关和三相整流模块造成焊机内部缺相,在弧焊电源带负载工作时,三相整流模块整流输出直流电压会低于 450V,甚至低于 400V。

(4) 电弧不稳定

1) 不能稳定焊接:输入电缆、输出电缆连接是否正确可靠,焊接参数是否正确,焊枪的导丝管导电嘴、气体流量是否正常,弧焊系统内部连线是否连接可靠。

2) 焊接时经常出现爆丝现象:输出电缆是否连接正确可靠,弧焊系统内部连线是否连接可靠、主控板、电流互感板上采样电阻阻值是否变大。

3) 间断性断弧:输出电缆是否连接正确可靠,焊枪的送丝软管、导电嘴是否正常、弧焊系统内部连线是否正确可靠。

2.4.2 焊接过程的远程故障诊断

采用 DSP 数字信号处理技术,配合 MCU 并行控制技术和 CANBUS 网络通信技术,组建分布式多处理协调控制系统。分布式多处理协调控制系统的特点如下:

1) 所有 DSP 模块采用智能化设计,系统结构文件自动生成,插入就可以工作。

2) 标准化模块,系统更新并多种组合模式。系统的工作和控制功能可以随时增加和减少,可以由一个或多个外设组成一套焊接系统。

3) 可以根据不同应用提供特殊设计的 DSP 控制模块,并集成到系统中。

4) 数字信号处理器技术集成在每个控制模块中,以提供高速和精密的控制。

5) 利用视窗技术,实现图像和数据结合编程。同时,可以集成焊接区域视频图像,方便操作者观察。

6) 利用各种数字通信技术,可以建立无限网络系统,实现远程遥控和故障诊断。

在实际焊接过程中。焊接过程监视和数据采集功能能使系统自动监视所有被要求的参数实际执行情况,并随时与预设值比较。如果超过焊接工程师设定的参数偏差限制,系统将执行焊接工程师设定的动作或报警,或者自动进入熄弧程序。数据采集功能用于在焊接过程中采集和记录实际的焊接参数和工艺过程。DSP 可以提供高速的数据采集能力,对于需要精确数据分析的场合,采集速度是非常关键的,数据的处理也非常重要。DSP 数据采集系统可以进行实时的数据采样、处理和分析。高速的实时数据分析系统保证得到监视的效果,同时不会造成大量的原始数据的堆积,并影响系统的存储空间。过程监视通常用于对数据进行分析,判断整个焊接过程是否按照程序预设进行,以及超差情况。一般这个过程在焊接后进行,DSP 是一个极为有力的平台,因为它的高速所提供的数据密度可以达到真正实时的效果。所有的分析后数据可以通过网络传送或打印、保存,方式可以

是图形和数据。

在焊接设备网络化的基础上,建立工业以太网网络上的焊接车间数字化管理和控制系统,实现在网焊接系统的状态信息管理,包括:焊接程序离机编程和网络传输、程序管理和操作、焊接参数实时记录和修改、焊接过程图像的传输和记录、远程检测和故障诊断、焊接设备、工程部门、生产管理部门之间的程序和信息共享。

2.4.3 焊接过程的网络化监测与群控技术

目前,焊接群控系统可以采取 PLC 群控和 PC 微机群控。通信方式可以采取 RS485、CAN 总线、工业以太网、无线通信等方式。群控系统要求的性能指标如下:

- 1) 实时性强,动态响应速度快。
- 2) 故障等信号可以实现自动上传。
- 3) 实现焊机通电申请的自动排队和优先权的判定。
- 4) 最大任务等待时间的设定,一般不超过 1 分钟(用户可自行调节)。
- 5) 焊机台数的限制,总线驱动能力达 110 个节点。
- 6) 实现总线竞争与故障自动离线功能要求。

焊接群控系统主要由三大部分组成:上位监控计算机系统模块、数据通信模块和单机焊接控制器模块,三大模块协调工作完成对整个系统的管理和监控工作。

上位监控计算机系统模块,是群组弧焊系统运行时的总中央处理器,群控制系统的中枢神经,是整个群控系统的核心。由它进行分派任务和监控工作,主要作用分为两个部分:

1) 与各个单机控制器通信,负责下达通电命令及接受焊接完成的停止工作反馈信息;实现对焊接过程的现场监控、显示、设备管理和故障的查询、处理;对数据进行存储和交换、在线修改和编写焊接规范、完成历史记录以及报表的打印等。

2) 完成通电管制和优先级排队的决策算法。当单个弧焊系统开始焊接任务之前,通过通信网络向上位主控计算机发出通电申请时,主控计算机根据当前的弧焊系统群组运行情况,调用应答控制算法计算出最佳方案,对通电申请进行反馈,即将通电允许命令及时分配给最合理的弧焊系统,然后弧焊系统才能通电完成焊接任务。

在焊接生产车间中,进行焊接加工的焊件因为焊接材料和焊接要求等工艺指标不尽相同,除了需要不同的焊接参数与之配合外,还可能要用到各种不同型号的弧焊系统来完成理想的焊接任务,因此一组弧焊群控系统中包含有多种不同规格型号的弧焊系统。

对于同种型号或不同型号的各台弧焊系统在群控系统分配布置上,应事先考虑功能和电气性能等因素的影响。其中考虑到电网容量的问题,将依据三相电流平衡的原则给各台弧焊系统分配固定物理位置,每台弧焊系统固定分配象限队列和编号。根据网络设计要求,弧焊系统控制器还集成有网络接口,实现与上位机监控管理模块的通信功能。二者通过 CAN 总线进行数据的交换、查询。数据通信模块主要完成上位监控计算机和焊机控制器群组之间的数据通信任务。基于系统需要,采用一点对多点的设计结构。CAN 总线的通信能力及总线竞争方式,可满足群控系统的需要。

参考文献

- [1] 胡绳荪. 焊接自动化技术及其应用 [M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [2] 陈善本. 焊接过程现代控制技术 [M]. 北京:哈尔滨工业大学出版社,2003.
- [3] 申忠如,郭福田,丁晖. 现代测试技术与系统设计 [M]. 西安:西安交通大学出版社,2006.
- [4] 殷树言. CO₂ 焊接设备原理与调试 [M]. 北京:机械工业出版社,2000.

第3章 焊接过程的信息处理及质量控制

本章分析了焊接动态过程电信号和图像信号的特点，以及电信号和图像信号的检测与处理技术。重点论述了小波变换、数学形态学和分形技术在图像处理中的应用原理，通过实例分析了焊缝跟踪控制和熔透控制方法。

3.1 焊接过程的动态信息及控制

随着电力电子技术、数字化技术的发展，数字信号处理器（DSP）以及高性能的单片机（MCU）在功能、处理速度和处理能力方面都取得了划时代的突破，小波变换、分形、数学形态学等数字信号处理的理论与实现手段获得了前所未有的发展，成为当今发展最快的学科之一。数字信号处理器 DSP 和高档单片机 MCU 被成功引入焊接电源控制领域后，为进一步提高焊接工艺的动态性能提供了可能，为尝试新的焊接工艺提供了机遇。MCU 和 DSP 以其稳定性、可重复性、实时数字信号处理、柔性化编程、大规模集成等特点成为焊接电源控制和数字信号处理的最佳选择器件，使得数字化弧焊电源应运而生。为了改善焊接的动态性能，除了采取高速的数字信号处理芯片 DSP 和高性能的动态特性控制算法外，逆变式弧焊机开关管也采用 100kHz 以上的主频率，这样响应能力更强。

3.1.1 焊接过程动态信息的特点

以奥地利 Fronius 公司的 TRANS PLUS SYNERGIC（TPS）系列焊机为代表的全功能焊机，成为了智能弧焊机在欧美国家成熟发展的标志。TRANS PLUS SYNERGIC 系列焊机采用“MCU + DSP”相结合的控制技术，通过 DSP 集中处理所有焊接数据，检测和控制整个焊接过程，具有引弧、精确控制电弧、专家系统、一机多功能、焊接数据接口和评价系统等功能，同时实现了焊机程序的软件升级、多种焊接材料、工艺的适用性以及焊接工艺参数的离线处理等。

在 CO₂ 焊接研发方面，唐山松下对我国 CO₂ 焊接技术的发展有很大的影响。在数字化焊机方面，推出了 YD—350DR3 型焊机，是一款专门用于焊接钢材的 CO₂/MAG 焊机。可以看到，这是一台专用焊机，面板较简单，便于调节焊接参数，具有电流波形控制功能，可以调节出不同类型的电弧，其中刚性电弧适于立焊和高速焊，而柔性电弧适于低飞溅和大电流焊接。还可以在更宽的电流范围内实现稳定的焊接，引弧成功率高，用数字编码器控制送丝机，送丝速度更加稳定，使其焊接过程也更稳定，飞溅小。利用模糊控制技术，提高了抗焊丝伸出长度的干扰作用。具有存储和记忆焊接条件的功能，还能与焊接机器人实现无缝连接。日本 OTC 的 D 系列数字化弧焊逆变器主频率为 80 kHz，具有良好的动态响应能力和独特的电流波形控制方式，其中 CO₂ 焊过程稳定，飞溅小，熔深均匀，有丰富的焊接条件存储与记忆功能，能实现 100% 的瞬时起弧，可实现多种材料的焊接。通过数字信号处理芯片给出多种斜率、不同幅值的 CO₂ 短路电流波形，使得 CO₂ 焊的工艺效果在不同的焊接电流范围内都能改善。

1. 弧焊动态过程电信号特点

对于 CO₂ 焊恒压工艺，也可以通过捕捉瞬时电压的变化来分析弧焊电源的动态特性。本试验采用瞬间短路的方法，也就是瞬时增大负载，观察电压波形的变化。实测恒压瞬时响应情况波形如图 5-3-1 所示。

T_s 为短路时间，指瞬时短路后，电压输出响应从拉低到重新上升所持续的时间。

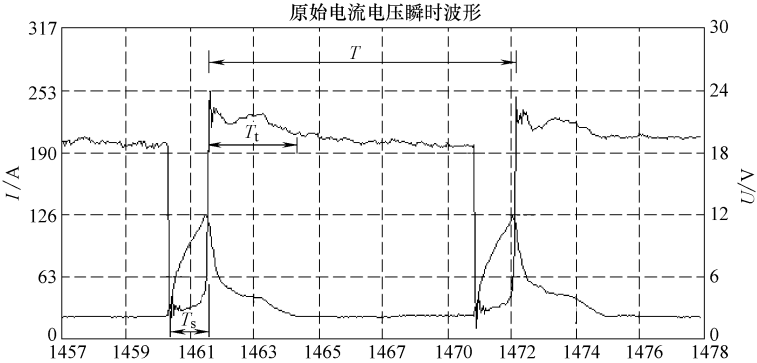


图 5-3-1 实测恒压瞬时响应特性波形

T_t 为过渡时间，表示电压输出响应在到达电压稳态值 $U_b(\infty)$ 附近，取 $\pm 0.05 U_b(\infty)$ 作为误差带，当响应曲线到达并不再超过该误差带所需的时间。 T 为短路周期，指从一个瞬时短路到下一个瞬时短路的时间。

对于恒压特性的 CO_2 焊接工艺而言，在短路过渡时，过渡频率 f ($1/T$) 对于焊接过程的稳定和焊缝成形以及焊接质量有直接的影响。焊机系统的动态特性与系统控制参数有直接关系，根据工艺要求和动态性能指标进行 PID 参数设计的内容。

对于普通 CO_2 焊机来说，可以稳定焊接的最小电流一般为 70A 左右，所设计的智能焊机，可以实现最小 30A 的焊接，电流达到 40A 时可以保证稳定焊接。如图 5-3-2 所示，当电流为 30A 时，电流波形稳定，过渡频率比较高，但是从焊缝上可以看出有少量的断弧。如图 5-3-3 所示，当电流为 40A 时，过渡频率进一步提高，焊缝成形连续美观，没有出现断弧。

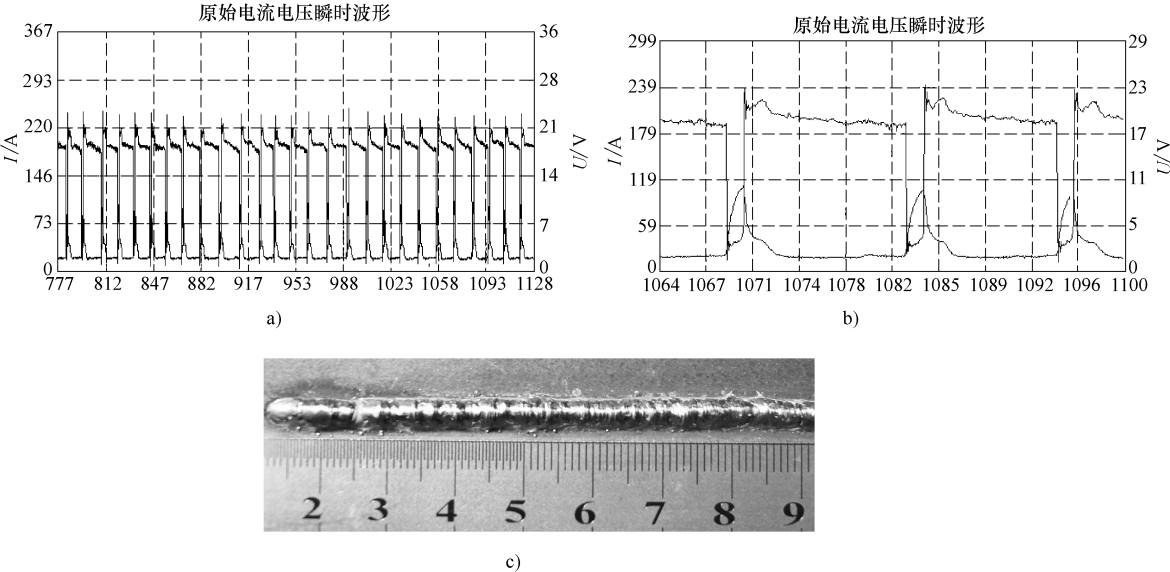


图 5-3-2 平均电流为 30A 时的波形和焊缝

a) 连续波形 b) 波形放大 c) 焊缝外观

80A、120A 是较常用的薄板焊接电流区域，它们的电流电压波形和焊缝外观照片，如图 5-3-4、图 5-3-5 所示。从图可见，随着焊接电流的增大，过渡频率逐渐提高，成形纹波变密，焊缝的熔深

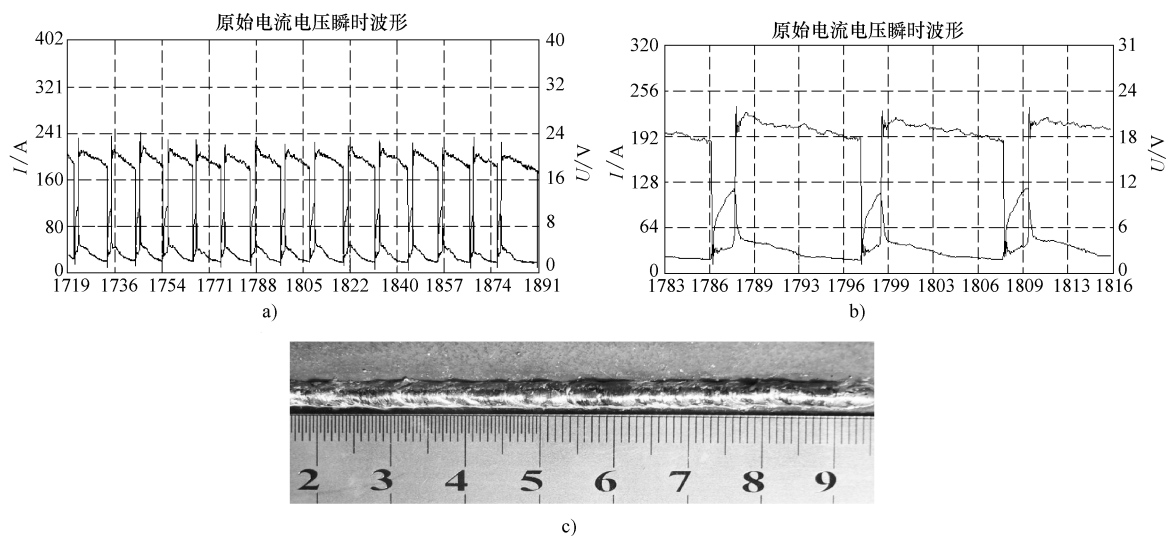


图 5-3-3 平均电流为 40A 时的波形和焊缝

a) 连续波形 b) 波形放大 c) 焊缝外观

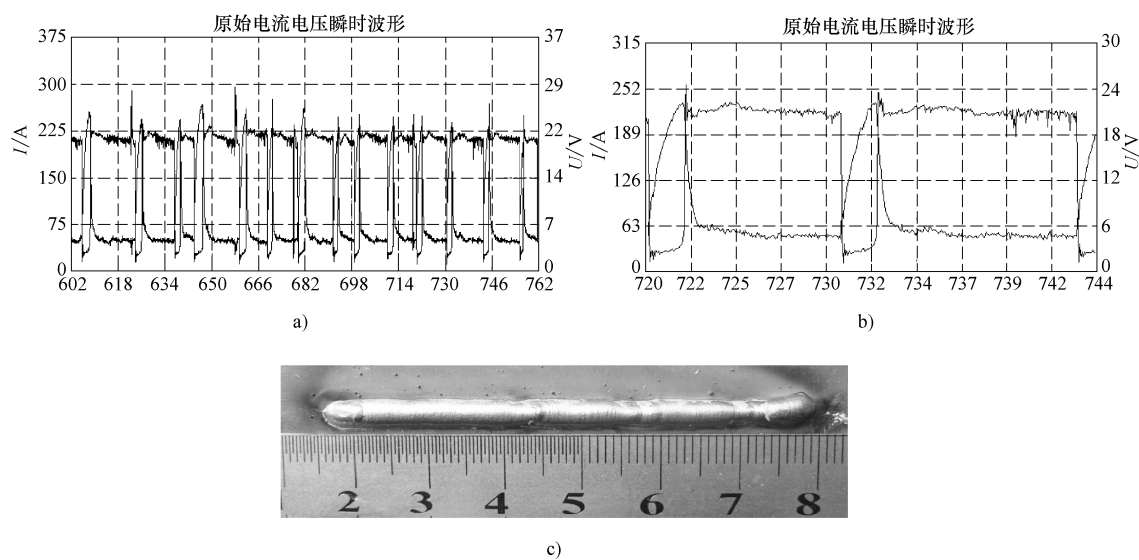


图 5-3-4 平均电流为 80A 时的波形和焊缝

a) 连续波形 b) 波形放大 c) 焊缝外观

逐渐增加。

图 5-3-6 所示为系统运行在不同微分时间 T_d 的 PID 控制下的电流输出波形。比较 T_d 从 50ms 到 1s 的输出电流波形可以看出, 当 T_d 取值较小时, 电流输出响应快, 但是有一定的过冲量。随着 T_d 的值慢慢增加, 微分作用愈加明显, 系统的稳定性逐步降低。当大到一定程度 (如 500ms) 之后, 系统变得不稳定。

试验证明, 当 $T_d = 100ms$ 时, 在脉冲阶跃信号作用下, 电流上升和下降的速度最快, 最大超调量为 3%, 电流输出稳定。

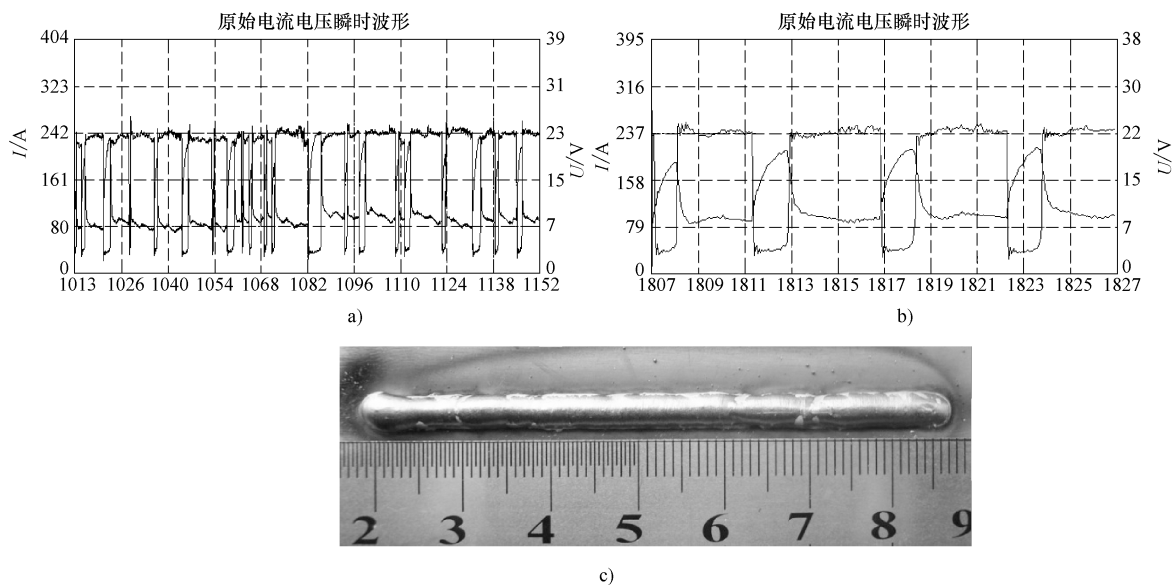
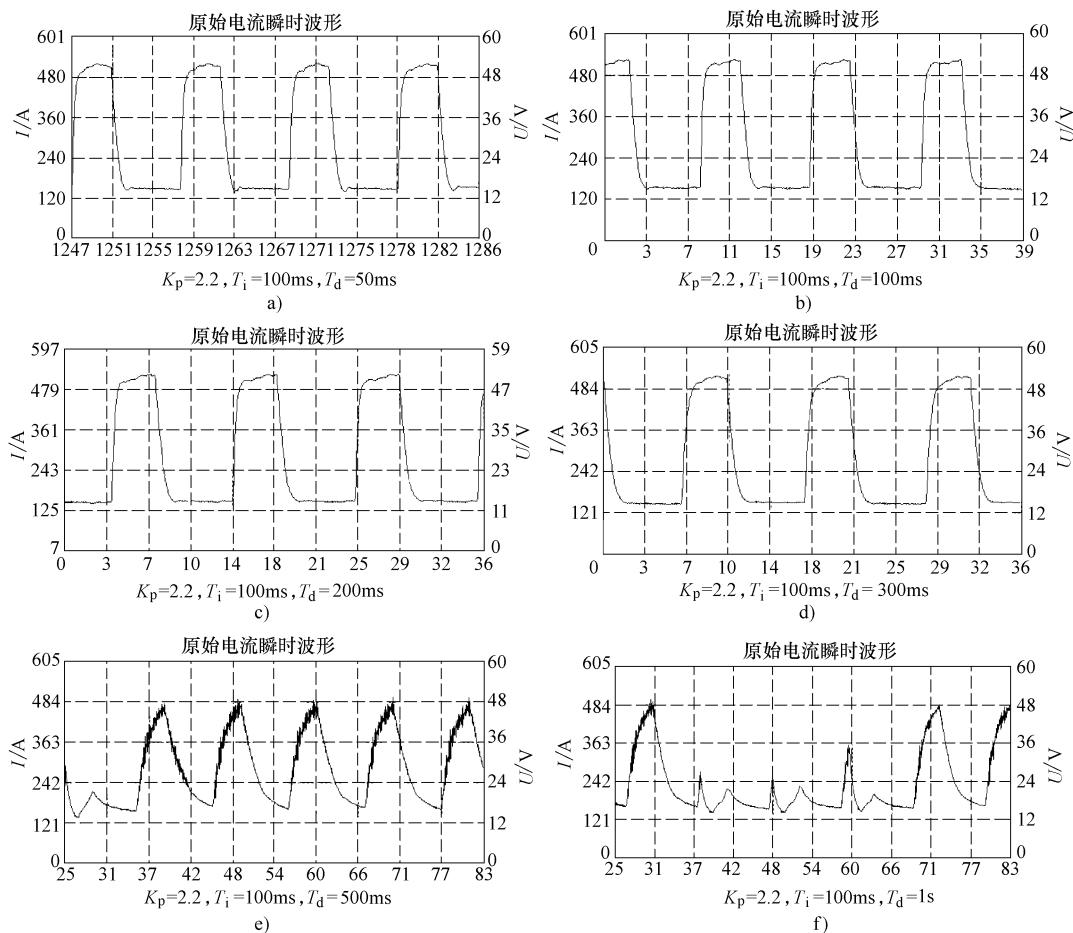


图 5-3-5 平均电流为 120A 时的波形和焊缝

a) 连续波形 b) 波形放大 c) 焊缝外观

图 5-3-6 不同微分时间 T_d 的 PID 控制下的电流输出波形

由此可以得出在取定比例系数 $K_p = 2.2$, 积分时间 $T_i = 100\text{ms}$, 微分时间 $T_d = 500\text{ms}$, 可以得到理想的控制效果, 这也是通过物理试验法确定的试验条件下的最佳 PID 参数。

在 DP-GMAW 工艺中, 需要调节的参数有 11 个: 强脉冲峰值电流 I_{ps} 、强脉冲峰值电流时间 t_{ps} 、强脉冲基值电流 I_{bs} 、强脉冲基值时间 t_{bs} 、强脉冲个数 n_s 、弱脉冲峰值电流 I_{pw} 、弱脉冲峰值电流时间 t_{pw} 、弱脉冲基值电流 I_{bw} 、弱脉冲基值时间 t_{bw} 、弱脉冲个数 n_w 以及送丝速度。峰值电流 I_p 、峰值电流时间 t_p 、基值电流 I_b 、基值时间 t_b 的取定与单脉冲焊一致, 即要确保熔滴过渡实现一脉一滴, 需要满足“碳钢焊丝一脉一滴临界电流曲线”的要求。设定值需要在曲线的上方。基值电流 I_b 保持电弧稳定, 不断弧; 基值时间 t_b 控制电流周期, 保证焊缝成形。脉冲个数的选定原则是, 确保形成鱼鳞纹, 提高焊缝质量。

通过比较试验证明, 当强脉冲基值时间 t_{bs} 、弱脉冲基值时间 t_{bw} 取为 8ms , 强脉冲个数 n_s 、弱脉冲个数 n_w 取为 15 时, 可得到美观的鱼鳞纹, 若 t_{bs} 、 t_{bw} 、 n_s 、 n_w 取值不当, 则容易出现各种焊接缺陷。

图 5-3-7 所示为 80A 和 160A 焊接电流时的波形。

采用梯形调制脉冲波形控制加脉动送丝控制技术, 实现冷弧焊铝工艺。工艺条件与 DP-GMAW 工艺基本相同, 只要改为脉动送丝即可。图 5-3-8 所示为 120A 电流下的波形和焊缝成形。

该波形非常平缓, 强弱脉冲群之间有上升与下降段, 实现了能量的连续过渡, 焊接过程更加平稳, 焊缝美观, 起弧收弧效果好。

对不同频率下的 120A 焊接试验, 由焊缝可知, 2Hz 时鱼鳞纹间距过宽, 影响焊缝质量, 5Hz 时的焊缝效果很好, 鱼鳞纹很密, 随着频率的进一步增大, 焊缝鱼鳞纹变得越来越细小密集, 接近单脉冲的效果。因此通过不同频率焊接试验, 在 $3 \sim 5\text{Hz}$ 时, 焊接的效果最好。

正弦波焊铝的试验, 取得了很好的焊接效果, 图 5-3-9 所示为正弦波的示意图, 是在梯形波的基础上进一步演化而来的, 以下为正弦波的一组焊接波形与焊缝。

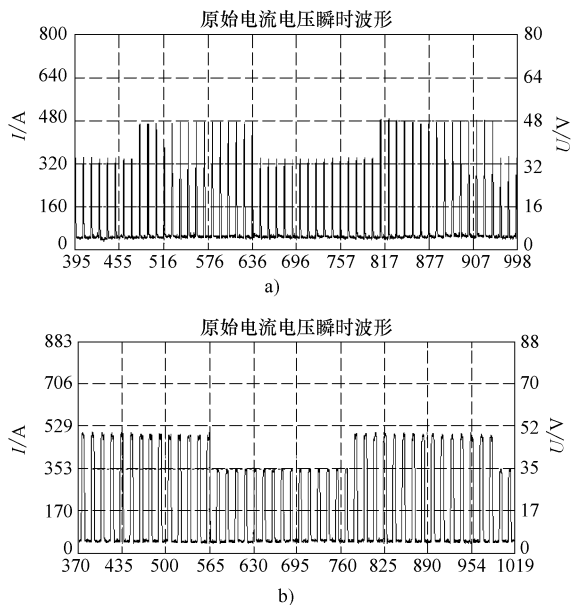


图 5-3-7 80A、160A 焊接电流时的波形

a) 80A 焊接波形 b) 160A 焊接波形

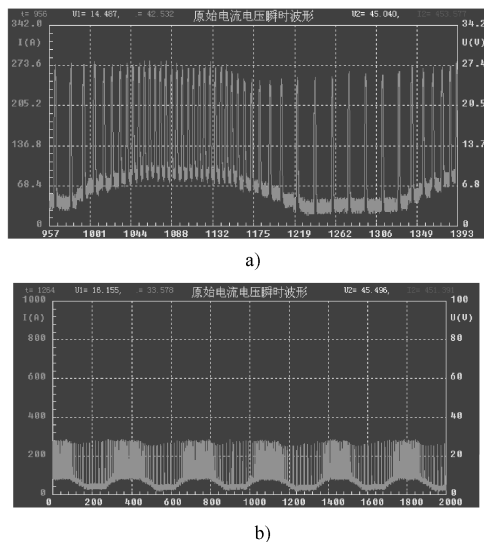


图 5-3-8 120A 电流波形和焊缝成形

a) 连续电流波形 b) 电流波形细节

试验基本条件如下：试件为厚 3.0mm 的铝板；焊丝牌号为 1070 纯铝，直径为 $\phi 1.2\text{mm}$ ；保护气体为高纯氩；气体流量为 20L/min，焊丝伸出长度为 15mm；平板堆焊。在一个正弦波周期 T 内，设定脉冲电流峰值个数为 N ，在保持正负半周相等，均为 $T/2$ ，且正弦波正半周期内的脉冲电流峰值个数为其负半周期内的脉冲电流峰值个数的 1 倍时。当 N 为 45 时，试验结果如图 5-3-10 所示。

2. 弧焊动态过程的图像信号

用 CCD 直接观察看到的区域一般都能达到 640×480 像素或以上，按一个像素对应 0.1mm（标定值）来计算，可以看到整个焊接

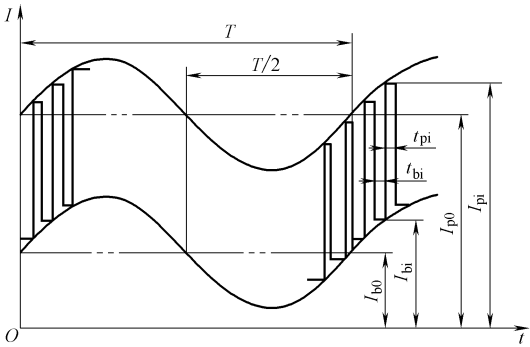


图 5-3-9 正弦波控制脉冲焊波形参数图

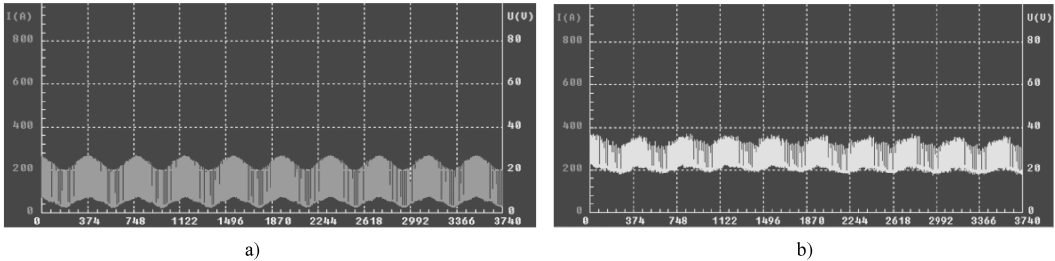


图 5-3-10 正弦波调制焊接电流和焊接电压

a) 焊接电流实时波形 b) 焊接电压实时波形

区域，但并不是图像的所有部分都需要处理，通常只关心熔池和沿焊接方向熔池前端的一段焊缝。为了有效利用计算机的计算能力和内存空间，加快处理速度，通过在程序中测定算法的处理时间和控制机构行走的反应时间后，一般将图像采集的区域定在 100×100 像素大小范围内。这样的区域

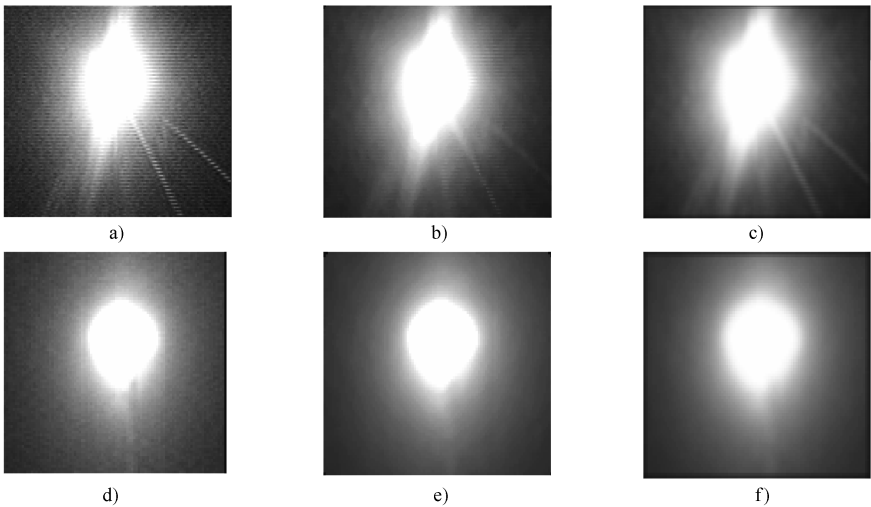


图 5-3-11 中值滤波和领域平均值的图像比较

a) MAG 焊原始熔池 b) 中值滤波后 MAG 焊熔池 c) 领域平均后 MAG 焊熔池
d) TIG 焊原始熔池 e) 中值滤波后 TIG 焊熔池 f) 领域平均后 TIG 焊熔池

已经包含了所有有用信息,图 5-3-11 所示为 MAG 焊和 TIG 焊过程采集到的直焊缝标准图像。从图中可以清楚地看到焊缝的双边缘特征和熔池的边缘。

3.1.2 焊接过程动态信息的检测

1. 电信号的检测

由于焊接过程是一个相当复杂的物理化学变化过程,很多因素都能对电弧的各种参数产生影响,特别是对焊接电流电压信号产生相当大的影响,因而正确选用焊接参数检测传感器是非常重要的,一般应遵循如下的选择原则:

1) 量程和精度:传感器的量程和精度是传感器的两个非常重要的技术指标。
2) 频响特性:必须保证信号在测试范围内不失真。
3) 输出能力:传感器要有较强的输出能力,要求输出阻抗低,其带负载和抗干扰能力强,信噪比高。

4) 线性范围:任何传感器都有一定的线性范围,选择时应考虑被测物理量的变化范围,使得传感器的线性误差在允许的范围内。

5) 隔离和抗干扰能力:焊接参数检测用传感器应具有较高的隔离能力和抗干扰能力,以保证强电与弱电信号无直接的物理连接,避免被检测的强电信号干扰和破坏测试系统。焊接电弧电参数检测所选用的传感器的隔离方式一般为光电隔离、电磁隔离、霍尔效应隔离。

需要采集的信号包括输出电流和电压信号。在满足以上对反馈电路的要求下,采用电流霍尔传感器采集电流信号,图 5-3-12 所示为电流反馈调理电路。

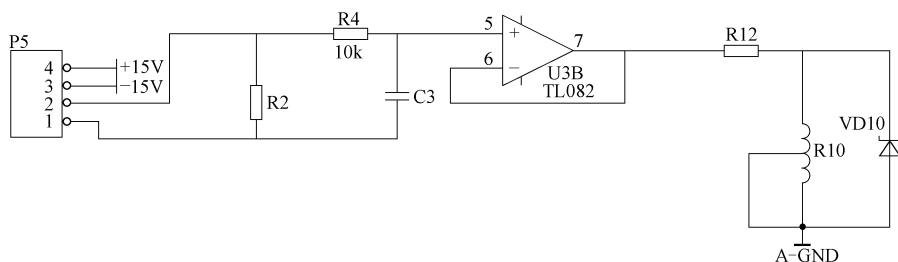


图 5-3-12 电流反馈调理电路

常用的电流取样方法有两种:一种是分流器,一种是霍尔传感器。

分流器是根据电流流过电阻时在电阻两端产生电压的原理制成的。分流器主要采用锰镍铜合金制成,其额定电流时的压降是 60mV,也可用 75mV、100mV、120mV、150mV 及 300mV。它的成本比较低,但信号较弱,一般采用放大器,容易引入干扰信号,信噪比较差。

电流霍尔传感器是应用霍尔效应制成的电流测定元件,具有很好的线性度,并且和被测电流完全隔离。它输出的电压与被测电流产生的磁场有良好的线性关系,输出电压直接反应被测导线中的电流大小。霍尔传感器分为两类:一类是开环(直测式、直检式);另一类是闭环(零磁通式、磁平衡式),相比于分流器,它反馈的信号比较强,一般是 100A 的电流对应 1V 的电压信号,所以它的抗干扰能力比较强,而且不需要串联在主电路中,不会对主电路参数产生任何影响。因此在本设计中采用的是开环霍尔传感器(工作电压为 $\pm 15V$)作为电流的取样方式,使得当焊接电流从 0 ~ 500A 变化时,反馈电路处理后的信号变化范围是 0 ~ 5V。再经过分压、滤波、限压等调整后送给 ADC。

图 5-3-13 所示为电压反馈调理电路。该电路直接对输出端电压进行取样,经过低通滤波去除

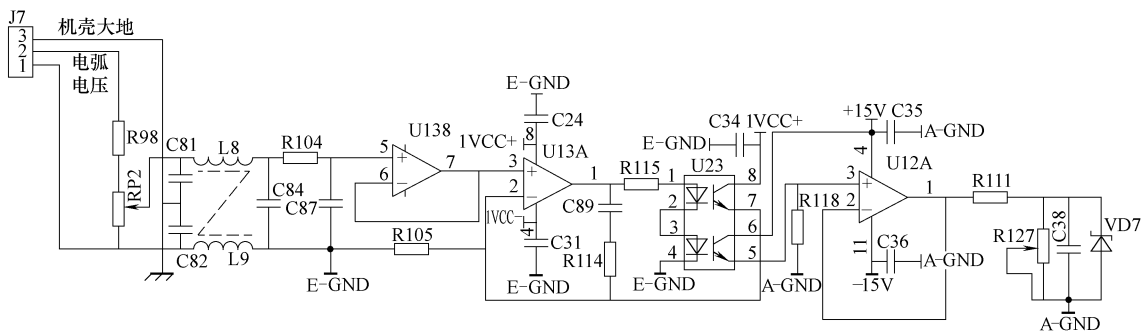


图 5-3-13 电压反馈调理电路

信号中的高频信号，再经过运放、线性光耦隔离，调理成 0~5V 的直流电压信号，最后再通过分压和限压送给 ADC。

2. 图像信号的检测

如图 5-3-14 所示，基于图像视觉的焊缝跟踪系统，由三个部分组成：视觉传感器、图像处理系统和焊缝跟踪控制。视觉传感器获得焊缝的图像信息，并将数字图像信息传输到计算机，通过图像预处理系统减少图像中的噪声污染，由图像识别算法提取焊缝特征信息，获得焊缝与电弧偏差信息。以此偏差作为焊缝跟踪控制系统的输入信号，依据控制算法获得驱动信号控制焊炬运动，实现焊缝跟踪的实时控制。

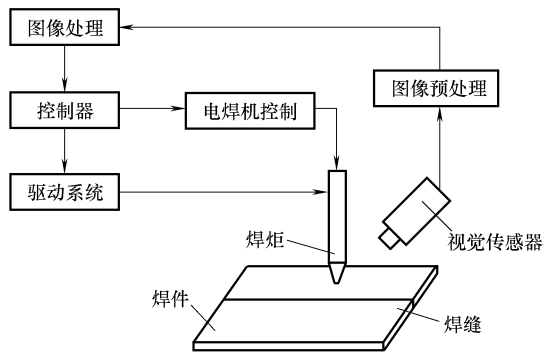


图 5-3-14 焊缝图像跟踪控制系统

焊缝视觉图像传感采集的方法有被动光视觉和主动光视觉法，被动视觉法不使用辅助光源，直接用 CCD 拍摄在弧光或普通光源背景下的焊接区图像。主动光视觉通常使用激光辅助光源，向工件焊缝区投射特种光束、光面或编码图形，然后用 CCD 拍摄焊缝区图像，获取焊缝图像信息。机器视觉系统原理如图 5-3-15 所示。

3. 电信号与图像信号的同步检测

系统硬件部分由焊接试验平台、弧焊电源、电信号采集与小波分析仪、高速摄像机以及激光背光光路系统构成。测试分析系统的基本结构如图 5-3-16 所示。

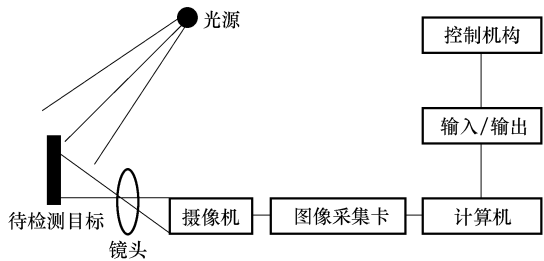


图 5-3-15 机器视觉系统原理

由于焊丝及熔滴均处于极强的电弧光包围之中，直接拍摄得到的画面为电弧的形态变化，看不见电弧中心熔滴的状态和运动行为。因此，采用背光阴影法来拍摄熔滴过渡行为，背光阴影法是使用正逆光拍摄的方法。由图 5-3-16 可见，在待拍摄的焊接电弧背后，用另一个强光源照射，可以衬托出焊丝和熔滴的形态；同时在摄像机物镜前，用合适的滤光片以及小孔光阑等将焊接电弧的弧光滤掉一部分，从而拍摄到焊丝及熔滴

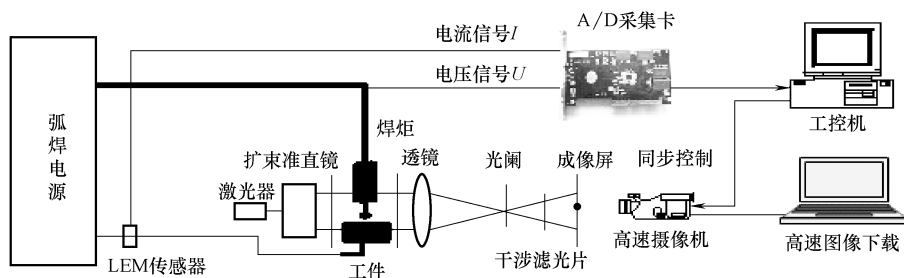


图 5-3-16 测试分析系统的基本结构

的阴影像。图中各光学元件的中心应严格位于同一条直线上，这样才能保证熔滴的影像画面亮度均匀。

氦氖激光器具有连续输出激光的能力，输出光束的相干性及方向性很强，居各类激光器之首。本装置选用氦氖气体激光器（He-Ne）作为背光光源，光束发散角小于 0.75mrad ，激光器长约 1m ，输出激光波长为 632.8nm ，波长的稳定度高达 10^{-10} 量级，光斑直径为 $1\sim 3\text{mm}$ ，输出功率大于 25mW ，工作电流为 $14\sim 18\text{mA}$ 。由于激光光源对焊接熔滴过渡过程高速摄像效果有较大影响，所以选择激光器既要考虑激光器的功率大小，也要注意到波长、光束直径和激光器价格等因素。

焊接电弧的辐射主要来自于等离子体电弧、熔池和焊丝电极，从熔化的焊丝和熔池金属表面上发出的辐射含较多的可见光，但这些可见光的强度小于电弧等离子体发出的光的强度，焊接等离子体发出的主要为蓝紫光（波长大约为 440nm ），为了清晰地拍摄焊丝熔滴过渡，可以通过合理选择滤光片滤除大部分电弧光，因此选择输出波长为 632.8nm He-Ne 激光器作为背光光源。

激光器的输出功率由焊接过程电弧及烟尘特性、光路设计、激光波长、高速摄像机性能、信号处理方法等因素决定，焊接电弧的辐射是由一系列不连续的特征波长的峰组成，波长与保护气体的种类关系较大，所选激光器功率至少要比同波长电弧辐射大一个数量级。激光背光强度较大一些，可以有效消除焊接电弧光辉，把电弧中各细小物体如飞溅显示出来，背光强度的控制可以通过调整激光光源的聚焦程度来实现。

3.1.3 焊接过程动态信息的处理

1. 弧焊电信号动态处理

在脉冲 MIG 焊（P-GMAW）和双脉冲焊（DP-GMAW）过程中，弧长是在实时变化的。如何实现 P-GMAW 和 DP-GMAW 焊接过程中弧长进行实时控制也是 P-GMAW 和 DP-GMAW 的研究热点之一。传统的电弧长度控制方法有以下几种。

（1）Synergic 控制法 Synergic 控制系统是英国焊接研究所发明的一种方法，是目前已发展的脉冲 MIG 控制系统中应用最为广泛的一种方法。其原理是：弧焊电源外特性采用恒流控制，通过两根恒流外特性的切换实现脉冲焊接，焊接参数的控制利用送丝速度作为信号，按照一定的数学模型来控制电弧的脉冲规范参数，以便使电弧在任何送丝速度下均获得最佳的弧长和最佳的熔滴过渡方式，实现了脉冲 MIG 焊的单旋钮控制，如图 5-3-17 所示。其设计基于两个准则：一是保证熔化速度和送丝速度相等以维持恒定的弧长，二是保证一个脉冲至少过渡一个熔滴。具体的调节过程是：仅调节送丝速度（平均电流），然后根据输入的焊接条件（被焊材料种类、焊丝直径或自设定的规范）和送丝速度同脉冲频率的关系，自动设置脉冲峰值电流、峰值时间和脉冲周期，其特点是响应速度快，输出脉冲频率宽；缺点是：该控制方法实质上属于开环控制方式，所以该系统的抗

弧长干扰能力差。当遇到除送丝速度以外的干扰时,弧长将改变,熔滴的喷射过渡将会受到破坏。

(2) QH—ARC 控制法 清华大学潘际奎教授等人在 20 世纪 80 年代发明了 QH-ARC 控制法,建立在晶体管式弧焊电源基础上,其外特性为“口”字形。这种控制方式通过外特性控制来保证焊接过程的稳定,经过三次改进,QH-ARC103 为其最佳的控制法,是气保焊控制方法的一大创新。该法通过动态响应性能极好的弧焊电源,实现弧焊电源外特性的实时切换,电弧长度在两个设定值之间变化,系统具有很好的调节性能。但这些控制方法具体针对某些焊接工艺而研究,在实际应用中还需进一步改进。

(3) 弧长反馈闭环控制系统 关于此法,国内外已做了大量研究,其基本原理是利用弧长信号闭环反馈控制脉冲参数。如日本三菱电气公司采用了开环控制和闭环控制并用的方法控制 MIG 脉冲电弧。该控制方法首先根据送丝速度按照一定的数学模型来控制脉冲频率,再引入电弧平均电压的负反馈来调整脉冲参数以适应条件的变化和随机干扰。但是由于闭环反馈信号取自电弧平均电压,当遇到弧长干扰电流变化时,电弧电压并不代表弧长。电弧平均电压是通过积分环节获得的,弧长调节和恢复的动态品质较差。

其他可用于 P-GMAW 控制的方法还有 QH-ARC103 控制法、在线自动优化法、广义预测控制法等。日本 OTC 公司新研制的 GMA 脉冲电源 Digital Pulse,采用 IGBT 作为功率控制器件来提高功率主电路的控制性和可靠性、应用微机进行焊接程序控制和焊接参数预处理。采用软件程序来完成电流波形的灵活精密控制和弧长的高速稳定调节,其原理框图如图 5-3-18 所示。

采用基于动态队列的平均电压闭环控制算法,并通过脉冲变频技术调整波形,可以克服传统闭环控制中弧长调节和恢复的动态品质差的问题。

对于 P-GMAW 和 DP-GMAW 而言,电流波形对于熔滴过渡的形式以及焊缝的成形有着重要的影响。有很多学者对此展开了大量的研究工作。对于给定的焊丝直径、焊接材料和送丝速度,不同形式的脉冲电流波形,均可以得到稳定的电弧和熔滴过渡,但是为了满足不同条件、不同应用场合,需要选择合适的脉冲电流波形,通常可以从以下几个方面来考虑:热输入;熔化速度;焊缝形

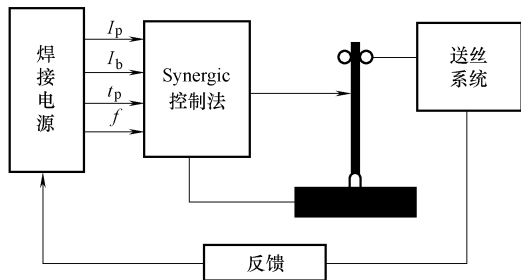


图 5-3-17 Synergic 控制方法原理框图

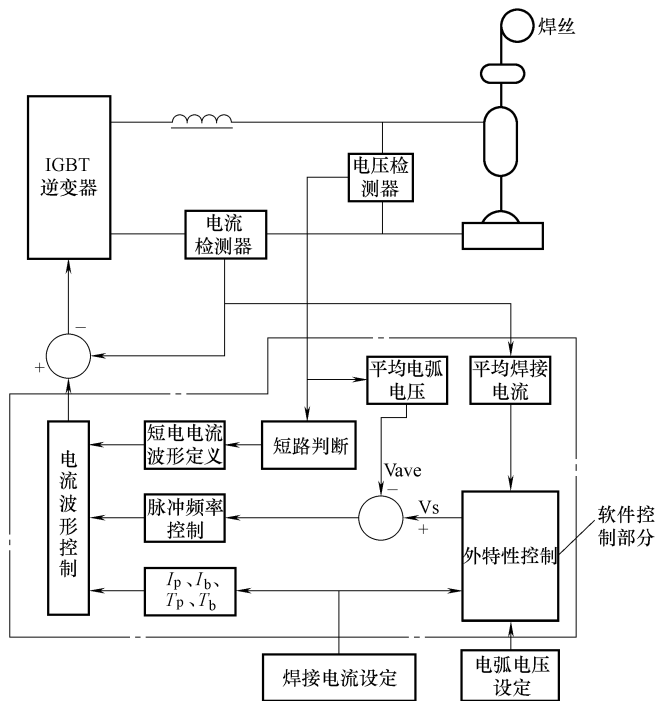


图 5-3-18 OTC 公司的脉冲电源 Digital Pulse 的原理框图

状；焊接时的污染，如噪声、烟尘等。对于脉冲电流波形中基本电流参数如基值电流、峰值电流，可以采用恒流控制方式得到。

A. Joseph 选用的焊机为 Lincoln 公司生产的 Power wave 455/R 系列焊机，对四种脉冲电流波形在不同的送丝速度条件下进行平板堆焊试验，分析了脉冲电流波形对焊缝形状的影响。结果表明，随送丝速度的增加，由于电流密度和电弧力的增大，焊缝的熔深、母材稀释率均有所增加；相同送丝速度下，随着峰值电流增加，焊缝的熔深和母材稀释率会有所降低。

C. S. Wu 针对一种新型的数字控制弧焊电源分析了脉冲电流波形对熔滴过渡形式的影响。该焊接电源输出的脉冲电流波形由四个基本参数 (I_b 、 I_p 、 t_b 、 t_p) 和六个附加参数 (初始脉冲电流上升斜率、电流上升斜率、脉冲电流初始下降斜率、电流下降斜率、熔滴过渡电流 I_d 、熔滴过渡时间 t_d)，如图 5-3-19 所示。为了获得可控的热输入和均匀的熔滴尺寸以及规则的熔滴过渡，峰值时间 t_p 、熔滴过渡时间 t_d 和熔滴过渡电流 I_d 是三个最为重要的参数。结果表明，通过六个附加脉冲电流参数，可以更为精确地调节焊接过程； t_p 与 t_d 的比值决定了熔滴过渡的形式。通过合理地选择 I_d 和 t_d ，可以在较宽的平均电流范围内，以较低的热输入获得理想的、稳定的一脉一滴熔滴过渡形式。

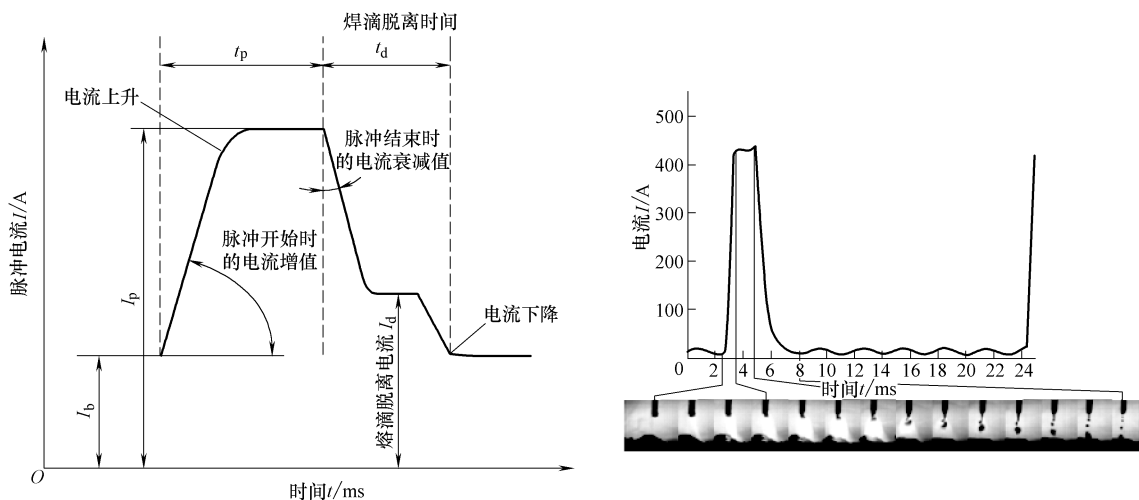


图 5-3-19 脉冲电流波形及焊缝形状图

相比 P-GMAW，DP-GMAW 的波形控制还需要控制低频脉冲的频率，以及强弱脉冲峰值电流、基值电流之间的差值。如图 5-3-20a 所示，采用了峰值电流恒定，调整基值电流的波控方法。结果

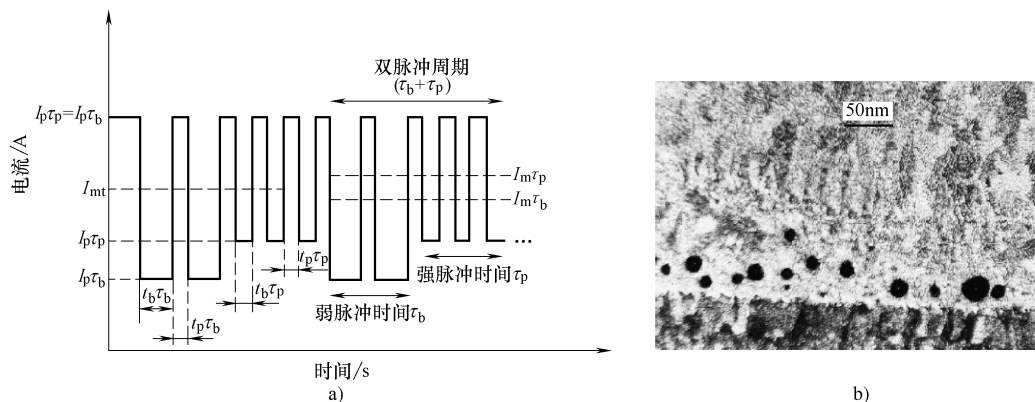


图 5-3-20 双脉冲波形和气孔测试结果

表明,这种 DP-GMAW 对于减少气孔的产生没有实质性的作用,同时也强调可能是送丝速度不稳定所造成的(见图 5-3-20b)。

如图 5-3-20 所示,DP-GMAW 电流大小、高频频率、低频调制频率、焊接速度对焊缝质量的影响,以及焊接速度、频率综合变动对鱼鳞纹宽度的影响。结果表明当强弱脉冲峰值电流相差 40 A 左右,高频频率为 250Hz 时可得到漂亮的焊缝成形。电流和高频频率改变对鱼鳞纹宽度的影响并不明显。在一定范围内,其他条件不变的情况下,随着低频频率的提高鱼鳞纹宽度减少,而随着焊接速度提高鱼鳞纹宽度明显增大。一般在低频调制频率为 3 ~ 5Hz,焊接速度为 0.55 ~ 0.90m/min 的范围内,通过合理的参数匹配可获理想的鱼鳞纹外观。

2. 图像信号处理

空域变换是基于图像中像素的处理(也叫点处理)。可以通过点运算来改变图像数据占据灰度的范围。常用的直接灰度变换有以下几种:

(1) 图像求反 就是将原图灰度值翻转。在具体变换时,将图像中每个像素的灰度值根据变换规则进行映射。

(2) 对比度增强 即增强原图的各部分的反差。实际中,往往是通过增强原图里的某两个灰度值之间的动态范围来实现的。例如在一些焊接图像中,感兴趣的特征仅占整个灰度级相当窄的一个范围,通过点运算可以扩展感兴趣特征的对比度使之占据可以显示灰度级的更大部分。增强对比度的代价是细节的丢失,但如果这些细节不是用户感兴趣的部分,就无关紧要了。

(3) 灰度切分 通过点运算可以控制图像的灰度范围,在灰度范围之内的像素值保持不变,而不在这个灰度范围内的像素灰度值则大大降低。它的目的其实与增强对比度类似,也是要将某个灰度值范围变得比较突出。

(4) 显示标定 黑白 CCD 采集的图像有能使图像视觉特征突出的优选灰度范围。用这样的显示设备时,焊接图像中具有相同对比度的较暗的和较亮的特征,在显示时却不能同样地表现出来。在这种情况下,可以利用点运算让感兴趣的所有特征显示同样的突出。将点运算和显示非线性组合起来相互抵消,以保持显示图像时的线性关系。

(5) 直方图均衡化 这个方法的基本思想是把原始图的直方图变换成均匀分布的形式,这样可以增加图像灰度值的动态范围,从而使图像的整体对比度增强。

灰度直方图是图像灰度级的函数,描述的是图像中具有某灰度级的像素的个数。一个 256 个灰度级的图像,其灰度统计直方图是一个 0 ~ 255 级的离散函数:

$$p(s_k) = n_k/n \quad k=0, 1, \dots, 255 \quad (5-3-1)$$

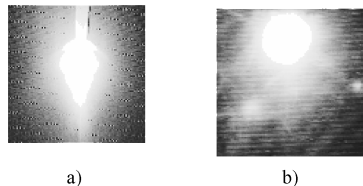
式中, s_k 为图像 $f(x, y)$ 的第 k 级灰度值; n_k 是 $f(x, y)$ 中具有灰度值 s_k 的像素的个数; n 是图像像素的总数。因为 $p(s_k)$ 给出了对 s_k 出现概率的一个估计,所以直方图提供的是原图的灰度值分布情况。

积累分布函数 q_k 表示为

$$q_k = \sum_{i=0}^k p_i \quad k=0, 1, \dots, 255 \quad (5-3-2)$$

上述计算 q_k 的公式实质上是建立了一个变换,它可将非均匀分布变成均匀分布。在得到变换函数值 q_k 之后,就可以建立新的灰度级映射的对应关系 ($k \rightarrow [q_k \times 255]$),这就是直方图的均衡化。

原始 TIG 焊和 MAG 焊过程熔池图像分别进行均衡化以后的焊接熔池图像如图 5-3-21 所示。此外,图像的二值化、三值化和多图像之间的运算等也是运用图像的点运算来实现的。



5-3-21 直方图均衡化后的焊接熔池图像
a) TIG 焊熔池 b) MAG 焊熔池

(6) 中值滤波 中值滤波的优点是运算简单, 速度较快, 在滤除叠加的白噪声和长尾噪声方面有很好的性能, 而且中值滤波器在去除噪声 (尤其是脉冲噪声) 的同时能很好地保持信号的细节信息 (如边缘和锐角等)。焊接过程中的熔池原始图像上存在着大量的非常强烈的弧光干扰和飞溅噪声, 而采用线性平滑模板进行滤波去除噪声的效果并不理想, 因此在熔池图像的预处理过程中主要采用非线性性的中值滤波方法。

对 TIG 焊过程和 MAG 焊过程的熔池图像进行试验, 试验中所用中值滤波模板为 3×3 模板。试验表明: 中值滤波的处理效果较好, 可以滤去大部分飞溅、噪声干扰。试验结果如图 5-3-22 所示。

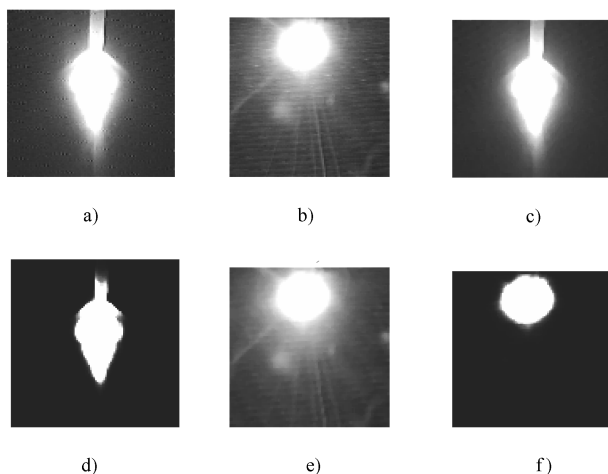


图 5-3-22 TIG 焊和 MAG 焊熔池原始图像及滤波自乘后的试验结果

a) 原始 TIG 焊熔池 b) 原始 MAG 焊熔池 c) 中值滤波后 TIG 焊熔池
d) 中值滤波加三次自乘 e) 中值滤波后 MAG 焊熔池 f) 中值滤波加三次自乘

图 5-3-22 所示为经过中值滤波和自乘处理后的 TIG 焊过程和 MAG 焊过程的熔池图像。从图 5-3-22c 和图 5-3-22e 中可以看出, 在仅进行中值滤波后, 熔池图像周边仍然存在很多光晕和飞溅, 处理效果并不理想。为了进一步消去噪声信号, 采用像素自乘的算法。

灰度值自乘算法为

$$f'(x, y) = \frac{[f(x, y) \times f(x, y)]}{255} \quad (5-3-3)$$

式中, $f(x, y)$ 为像素的灰度值。

图 5-3-22d 和图 5-3-22f 为经过三次自乘处理后的熔池图像, 可见, TIG 焊过程和 MAG 焊过程中产生的强弧光和大量飞溅噪声基本被去除。

3.2 焊接过程的信号处理方法

3.2.1 小波分析理论及其在焊接中的应用

小波变换是法国工程师 J. Morlet 在 1980 年前后从事石油地质信号处理时, 通过对加窗 Fourier 变换的改进而使用的分析工具。1984 年他与理论物理学家 A. Grossmann 合作, 基于物理直观构造了精确的小波变换反演公式, 从而建立了连续小波变换 (Continuous Wavelets Transform, CWT) 的几何体系。它是基于仿射群 (即伸缩/平移) 下的不变性。1985 年法国数学家 Y. Meyer 在看过 J. Morlet 等人的论文后, 将小波变换与纯数学领域中的谐波分析联系起来, 构造出具有很好的时间-频率局域特性的一维正交小波基。他的学生 P. G. Lemarie 把这一结果推广到 n 维的情形。1986 年 Y. Meyer 与从事计算机视觉和图像分析的 S. Mallat 合作提出多尺度分析的概念, 给出了构造小波基的一般方法。参照 P. J. Burt 和 J. Crowley 在信号处理中使用金字塔算法, S. Mallat 提出了在正交小波基下信号分解的快速算法, 即 Mallat 算法。1988 年 I. Daubechies 证明了具有有限支集正交小波基的存在性,

之后“适应基”小波包算法(WPT)、双正交样条小波理论及向量小波分析等理论大量涌现。

小波变换是迄今为止最有效的信号分析方法,它在时频平面上,同时具有很好的时间和频率分辨能力,能够分辨多尺度特征信号的细节部分。配合各种小波分解算法,如Mallat算法等,小波变换可用于图像降噪、特征信息提出、三维图像重建等方面。小波变换在信号处理、计算机视觉等领域发挥越来越大的作用。弧焊图像中含有丰富的空间和频率信息,一般的图像处理方法因缺乏有效的数学工具,有的只利用了统计信息或频率信息,没能充分地运用和处理图像的空间信息和频率信息。小波分析兼具处理空间和频率信息的特点。小波分析在弧焊图像降噪、边缘特征信息提取、视觉跟踪等方面具有重大的潜在优势。

对于含有大量噪声的弧焊图像信号,可用多分辨小波变换分解后所获得的小波系数来刻画,小波系数标明携带信号能量的权重,通过信号能量阈值法可达到降噪目的,其中以D. L. Donoho的软阈值降噪法效果最好。

小波变换的另一重要特性是用小波变换的模极大值表征信号的局部奇异性,由于小波变换有很好的时频定位功能,它不仅能检测出信号的奇异性,还能估计出奇异性大小,因此小波变换特别适于瞬变和突变信号分析。在图像信号中,突变部分如边缘和轮廓,携带重要的特征信息,采用多分辨小波变换的模极大值法可高效准确地进行边缘检测。弧焊图像的边缘特征提取是焊缝位置识别和预测熔池宽度的前提条件,而以往的边缘提取都是在原始图像上进行的,从小波多尺度的观点来看,这种边缘提取只是在一个尺度上进行的,不利于区分图像中的小结构轮廓和大结构边缘。利用小波变换技术进行弧焊图像的边缘提取,就产生了多尺度边缘,它是把原始图像分解,小波矢量的模局部极大值就对应着图像的边缘,在各个尺度上寻找模局部最大值来准确地确定弧焊图像的边缘特征。

利用小波变换的上述功能可对弧焊过程CCD视觉系统所获得的图像信息进行降噪处理、边缘检测,从而提取出焊炬与焊缝位置偏差信息、熔池宽度及形状信息,这些信息可分别用于焊缝自动跟踪和熔深的控制。

小波分析具有以下两个最大的特点:一是自适应性,它能根据分析对象自动调整有关参数;二是数学显微镜性质,它能根据观察的对象自动调焦,以取得最佳效果。实质上小波变换是一组高通、低通、带通滤波器组的组合,其滤波器具有自适应性,即分析检测高频分量时,时间窗口自动变窄、频率窗口增加;分析检测低频特性时,时间窗口自动变宽、频率窗口减少,或者说其滤波特性的品质因数 Q 恒为一常数,因而小波相当于一个恒 Q 滤波器。

小波分析是傅氏分析的重大突破,具有广泛的应用价值,有关小波的基本概念如下:

设 $\phi(t)$ 为允许小波,其离散二进制小波函数族 $\phi_{m,n}(t) = 2^{-m/2}\phi(2^{-m}t - n)$,即有

$$\phi_{m,n}(t) = 2^{-m/2}\phi(2^{-m}t - n) \quad m, n \in \mathbb{Z} \quad (5-3-4)$$

式中, m 称为尺度参数, n 称为平移参数。并设 $f(x) \in L^2(\mathbb{R})$,其离散小波变换定义为

$$\langle f, \phi_{m,n}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\phi_{m,n}(t)} dt \quad (5-3-5)$$

其意义如下:通过选取适应的放大倍数 $2^{-m/2}$,在一个特定的位置研究一个函数或信号过程,然后平移到另一个位置继续研究。如放大倍数放大,也就是尺度变小,可按小步长移动一个距离,反之亦然。

作为小波变换须满足以下几个基本条件:

1) 小波容许条件,即具有 k 阶消失矩: $\int_{-\infty}^{+\infty} t^k \phi(t) dt = 0 \quad k = 0, 1, \dots, N-1$

2) 小波完全重构条件: $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\phi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$

3) 稳定性条件: $0 < A \leq \sum_{j=-\infty}^{\infty} |\phi(2^{-j}\omega)| \leq B < \infty$

小波变换的多尺度分析设 $\{V_j\}$ 是一给定多尺度分析, $\varphi(t)$ 和 $\phi(t)$ 分别是相应的尺度函数和小波函数。记: $S_{2^j}f(t) = f(t)\varphi_{2^j}(t)$; $W_{2^j}f(t) = f(t)\phi_{2^j}(t)$, 则有

$$W_{2^j}f(t) = W_{2^{j-1}}f(t)G_{j-1}; S_{2^j}f(t) = S_{2^{j-1}}f(t)H_{j-1} \quad (5-3-6)$$

式 (5-3-6) 即为小波变换的快速算法 [H 和 G 分别是 $\varphi(t)$ 和 $\phi(t)$ 对应的滤波器], 其结构框图如图 5-3-23 所示。

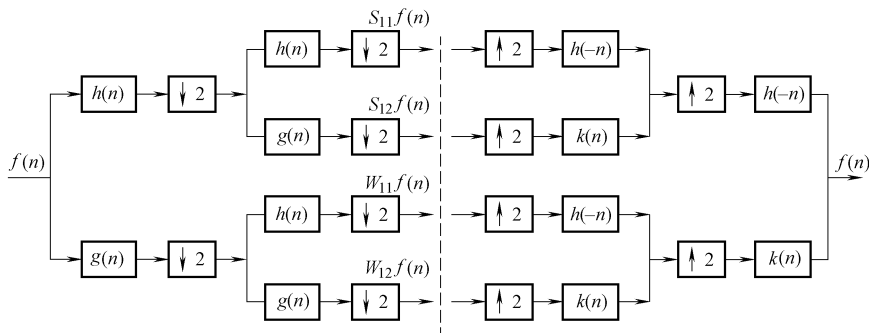


图 5-3-23 结构框图

让离散的信号序列 $f(n)$ 分别通过低通滤波器 $h(n)$ 和高通滤波器 $g(n)$, 就把 $f(n)$ 分解为四个序列 $S_{11}f(n)$ 、 $S_{12}f(n)$ 和 $W_{11}f(n)$ 、 $W_{12}f(n)$ 。再把 $S_{11}f(n)$ 、 $S_{12}f(n)$ 和 $W_{11}f(n)$ 、 $W_{12}f(n)$ 通过低通滤波器 $h(-n)$ 和高通滤波器 $k(n)$ 从而实现信号的重构 $f(n)$ 。 $\uparrow 2$ 表示上采样, $\downarrow 2$ 表示下采样。

这些滤波器组应满足式 (5-3-7):

$$\begin{aligned} |H(\omega)|^2 + G(\omega)K(\omega) &= 1 & \varphi(2\omega) &= e^{-j\omega/2}H(\omega)\varphi(\omega) \\ \phi(2\omega) &= e^{-j\omega/2}G(\omega)\varphi(\omega) & I(2\omega) &= e^{-j\omega/2}K(\omega)\varphi(\omega) \end{aligned} \quad (5-3-7)$$

用数学表达式表示的信号处理过程如下:

$$f(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \langle f, \varphi_{m,n} \rangle \varphi_{m,n}(t) + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \langle f, \varphi_{m,n} \rangle \varphi_{m,n}(t) \quad (5-3-8)$$

尺度函数 $\varphi(t)$ 应满足: $\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) dt = 1$ 。式 (5-3-8) 右边的第一部分用于提取满变轮廓和边缘一类的特征; 第二部分由小波函数用于在所有尺度上作细化处理。尺度因子 m 是根据信号性质和所要求的信息内容而事先选定的。Mallat 在多尺度分析的基础上, 给出了计算 $\langle f, \varphi_{m,n} \rangle$ 和 $\langle f, \phi_{m,n} \rangle$ 的快速算法——Mallat 算法。其算法优点是不需要知道 $\varphi(t)$ 和 $\phi(t)$ 的解析式, 且易于实现。

上述算法推广到二维的情形, 在变换的每一层次, 图像都被分解为 4 个 $1/4$ 大小的图像, 每一个都是由原图与一个小波基图像的内积后, 再经过在 x 和 y 方向都进行 2 倍的间隔抽样而生成, 这一过程就是二维多尺度分析。由于多尺度分析方法是在对图像进行多级分解的基础上进行逐级匹配, 并且扩展了传统的视差定义, 将两个限制条件: 视差连续性和方向一致性融合进视差的定义当中, 在视差求取的同时也完成了粗差剔除的过程, 因而提高了效率。加上多尺度分解提供了不同尺度下图像的信息, 并且变换后的能量大部分集中在低频部分, 方便对不同尺度下的小波系数进行分类, 有利于提取焊接图像的各种不同类型的边缘。

小波变换具有更为合理的子带多分辨分析与时频分析的框架, 而且与滤波器组的构造具有一一

对应的关系,这就为设计多滤波器组提供了一种方法。在结合各种不同的实际应用时,人们通常希望小波具有以下3个性质:

- 1) 对称性:从视觉的角度而言,人们对不对称的误差比对对称性的误差更为敏感。
- 2) 正交性:正交性能更好地去除信号的相关性,在提高图像的压缩比和复原图像方面应用比较多。
- 3) 紧支撑;在实际应用中,因为计算上的需要,希望获得有限长滤波器,这就要求小波是紧支撑的。

小波变换为图像的边缘分析提供了新的手段,它把图像信号分解成呈现在不同尺度上的多个分量。尺度 S 描绘出通过小波变换所提取的图像信号特征。在不同尺度下,离散信号的全面描述取决于在尺度 2^j 时,对整数 j 研究下的小波变换的局部极大值。通过增加两个局部极大值点间“尺寸”,可以增加信号的信息分量。小波变换的局部极大值点刻画出了图像信号突变点的位置(图像边缘位置)。通过选择适当的小波函数,可以使小波分解的细节分量真实地反映出图像的局部灰度突变点。

边缘检测是图像处理中基础而又重要的课题。目前已有梯度算子、拉普拉斯算子、Robert 算子、Sobel 算子、Marr 算子等众多方法。1992 年, S. Mallat 利用三阶中心 B 样条小波实现了多尺度边缘检测。从时频分析的角度对 n 阶 B 样条的性质进行了研究,认为三阶 B 样条在边缘提取中是渐近最优的。使用三阶中心 B 样条对图像进行平滑,然后用其一阶和二阶导数进行边缘检测。平滑的效果与所选取的 B 样条阶数,即与高斯函数的近似程度有关,但平滑函数的尺度不容易改变。Marr 提出的边缘检测算子,首先使用高斯函数对原始图像作平滑,经拉普拉斯算子运算、再用提取零交叉点的方法作边缘检测。谢绍辉、吴立德在文献中研究了用作平滑作用的高斯函数中的 σ 对所提取的边缘及输出信噪比的影响。

计算机视觉通常采用“由粗到细”的搜索识别方法。为了实现快速搜索的目的,在不同的阶段,对所提取边缘细节程度的要求是不同的。为了实现观察距离“调焦”和所检测边缘细节程度选择,取高斯函数的一阶和二阶导数作为小波基,使用 Mallat 算法实现小波分解。小波分解的级数对应于观察距离“调焦”,改变高斯函数的标准差 σ 可选择所检测边缘的细节程度。由此实现了具有两个可变参数的多尺度边缘检测。

基于 Mallat 提出的小波模极大值边缘检测方法和多孔算法,采用 B 样条构造的小波基进行熔池边缘和焊缝位置检测的具体步骤如下:

- 1) 先对图像 $f(x, y)$ 进行预处理,得到 $S_{2^j}f(x, y)$ 。
- 2) 对 $S_{2^j}f(x, y)$ 先用行与 h_0^j 作卷积,再用列与 h_0^j 作卷积,求得 $S_{2^{j+1}}f(x, y)$ 。

2	3	4
1		5
8	7	6

图 5-3-24 八邻域模板

- 3) 用 $S_{2^j}f(x, y)$ 的每一行与 h_1^j 作卷积,求得 $W_{2^j}^x f(x, y)$ 。
- 4) 用 $S_{2^j}f(x, y)$ 的每一列与 h_1^j 作卷积,求得 $W_{2^j}^y f(x, y)$ 。
- 5) 用八邻域模版扫描图像,求出局部模极大值点 $swf(x, y)$ 。
- 6) 计算各点幅角,并规格化为图 5-3-24 所示的 8 个方向。
- 7) 如果沿垂直于模极大值点幅角方向相邻两点的模小于该点,则认为该点是边缘点并标记。
- 8) 设置阈值 $T = t\% \times \max(swf(x, y))$,滤除由于噪声和干扰生成的极值点。
- 9) 对认定的边缘点重新设置灰度值。
- 10) 对剩下的点用轮廓跟踪法连线,并对连线进行细化处理。
- 11) 去除孤立点等。
- 12) 在 h_0^j 和 h_1^j 系数间插入 $2^j - 1$ 个零。

13) 重复步骤 (2) 到 (12), 直到 $j = J$ 。

关于阈值 T 的选取问题, 由于自适应阈值不仅难于定义, 而且计算麻烦, 效率很低, 所以采用了一种保留 $t\%$ 的像素作为候选边缘像素的方法。使用参数 t 而不是用一个绝对的阈值, 在选择时可以比较灵活, 尤其是在边缘强度变化范围未知时, 更是如此。

针对 MAG 焊熔池进行了试验研究。工艺试验条件如下: 采用 IGBT 式逆变电源, 焊接电流为 120A, 电压 22V, 送丝速度 5mm/s, 试件为 2mm 厚的 Q235A 钢板, 采用对接焊缝。图像采集系统配置: PIV CPU, 512M 内存, Matrox Imaging Adapter, CCD 摄像头。通过工艺试验, 实时获得熔池图像, 对比分析不同阈值和不同尺度对所获得图像边缘检测的影响。

在相同尺度下比较不同阈值的情况, 其熔池边缘及焊缝位置检测结果如图 5-3-25 所示。从图中可见, 随着所取阈值的减小, 边缘明显粗化, 定位精度受到影响, 但边缘的连续性得到增强。综合对比阈值 $t = 9.5$ 较为合适。

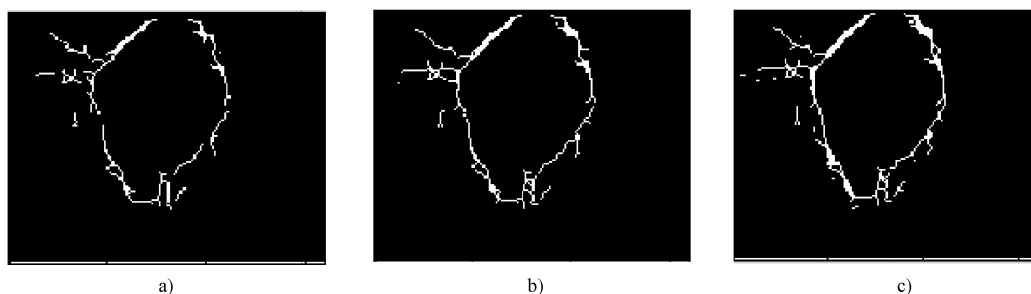


图 5-3-25 同一尺度不同阈值的熔池边缘及焊缝位置检测结果

a) $j=1, t=10$ b) $j=1, t=9.5$ c) $j=1, t=9$

在取相同阈值的情况下, 不同尺度下的熔池边缘及焊缝位置检测结果如图 5-3-26 所示, 可见, 随着 j 的增加, 熔池边缘的连续性变差, 焊缝的双边缘特征变明显, 在 $j=2$ 时, 焊缝特征最明显。

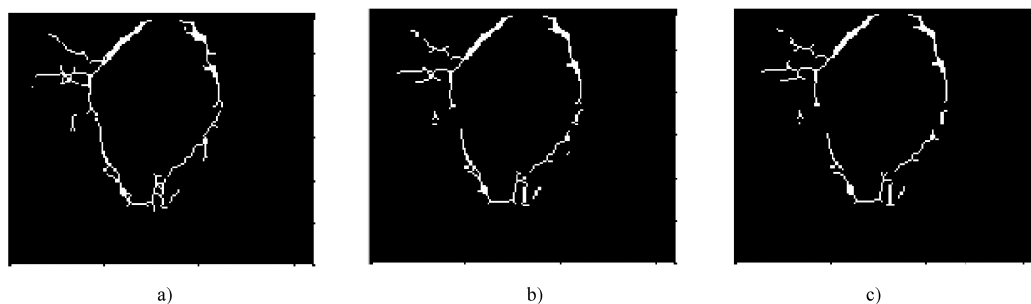


图 5-3-26 不同尺度下的熔池边缘及焊缝位置检测结果

a) $j=1$ b) $j=2$ c) $j=3$

综上所述, 阈值和尺度的变化都对图像边缘处理的最终结果有很重要的影响, 尤其是在边界闭合与焊缝边缘的检测上。相对而言, 阈值对边界闭合的影响比尺度大, 熔池边缘对尺度的变化并不敏感; 而由于焊缝边缘的双边缘特征, 尺度的变化对其检测结果的影响就很大。

3.2.2 分形理论及其在焊接中的应用

1975 年 B. B. Mandelbrot 在巴黎出版了法文著作《Les objets fractals: forme, basard et dimen-

sion》，标志着分形理论的正式诞生。1977年 B. B. Mandelbrot 在美国出版了其英文著作《Fractals: Form, Chance, and Dimension》。同年，他又出版了《The fractal Geometry of Nature》。这三本书并没有引起社会上太多人的关注，直到1982年，随着《The fractal Geometry of Nature》第二版的问世，在美国乃至欧洲，迅速形成了“分形热”。分形理论的诞生才不过20多年，但它对多种科学产生了巨大的影响。

分形理论长期以来一直被认为是对病态的、奇形怪状的、不规则的等一大类自然现象提供一种极其简洁的数学描述方法。分形理论作为近十几年来发展起来的一门新的数学理论，其研究对象是不规则但又具有统计自相似性的图形。目前，分形理论已被广泛应用于自然科学与社会科学的众多领域，在图像处理方面已经被应用于图像边缘检测、图像编码、图像压缩等领域。

焊接图像处理的关键是滤波和边缘检测，常用的图像处理算法如微分算子、曲面拟合法等都是基于线性理论的，而采用线性理论的近似方法处理实际的非线性过程很容易丢失或模糊图像的细节部分。而且线性图像处理算法是基于数值分析和卷积运算，其抗干扰性和实时性不好，若要大幅度地提高图像处理速度它们就显得有点力不从心。因此，采用分形这种非线性的图像处理算法对焊接图像进行预处理。

目前对分形的相对完整的描述为：分形是对没有特征长度但具有某种意义下的自相似的形体和结构的总称。

分形可以分为规则分形和不规则分形。在分形名词使用之前，一些数学家就提出过不少复杂和不光滑的集合，如Cantor集、Koth曲线、Sierpinski垫片、地毯和海绵等。这些都属于规则的分形图形，它们具有严格的自相似性；而自然界的许多事物所具有的不光滑性和复杂性往往是随机的，如蜿蜒曲折的海岸线、变幻无穷的布朗运动等，这类曲线的自相似性是近似的或统计意义上的，这种自相似性只存在于标度不变区域（用于测量的尺子的标度变化时，被测的图形不会发生变化），超出标度不变区域，自相似性不复存在，这类曲线为不规则分形。

通常所说的维数指的是拓扑维数。拓扑学是研究可以连续变化的图形的学科，而几何学是研究刚性图形的学科。在几何学中圆和正方形是不同的，但在拓扑学中两者是等价的，因为它们可以连续地相互变换，并且都将平面上的点分成图形内、图形外和图形上的3个集合，所以它们具有共性。类似地，一条十分曲折但连续的折线和一条直线是等价的，因为它们可以连续地相互变换，而且两者的拓扑维数都是1。

上述规则分形符合豪斯道夫维数大于拓扑维数的定义。Cantor集是无限多点形成的点集，其总长度趋于0，按照拓扑学的图形可以连续地变形的概念，这个集可以无限地收缩，所以它的拓扑维数为0，而它的豪斯道夫维数为0.631；Koch线的长度趋向无穷大，但面积为零，它可以连续地拉成直线，所以它的拓扑维数为1，而它的豪斯道夫维数为1.269；Sierpinski三角形的面积趋于0，所以它的拓扑维数为1，而它的豪斯道夫维数为1.585。

规则分形的自相似性和标度不变性（无标度区间，简单地说就是自相似性存在的区间）是无限的（测度尺度可以趋于无限小）。不管怎样缩小或者放大标度去观察图形，其组成部分和原来的图形没有区别，也就是说它具有无限的膨胀和收缩相对性。当然，任何分形图形的标度应小于等于整个图形的尺寸，实际可以观察到的分形的最小组成部分也是有限的。

总结以上关于分形维数的特点，可以发现分形维数的 D 的基本性质：

- 1) 分形维数 D 的大小反映了轮廓在空间的复杂不规则和充满空间的程度。 D 越大，细节越丰富； D 越小，细节越少。
- 2) 分形维数 D 与尺度无关。
- 3) 分形维数 D 是一个相对量。
- 4) 若集合 A 是欧氏空间的一个光滑（连续可微）的 m 维曲面，则分形维数 $D=m$ 。

维数是几何对象的重要特征量,它是几何对象中一个点的位置所需要的独立坐标数目。在分形学里维数可以为分数,通过分形维数可以描述和测量分形的特征。在实际中,常用 Richardson 定律来估计分形维数:

$$A(\varepsilon) = K\varepsilon^{d-D} \quad \varepsilon = 1, 2, 3 \dots$$

式中 ε ——尺度因子;

$A(\varepsilon)$ ——尺度 ε 下的度量特征值;

D ——分形维数;

d ——拓扑维数;

K ——分形系数。

对于理想的均匀二维灰度图像, $A(\varepsilon)$ 为图像表面积测度, 拓扑维数为 2, 则有 $A(\varepsilon) = K\varepsilon^{2-D}$ 。对于分形维数, 人们倾注了许多注意力, 并指出分形维数是图像表面不规则程度的一种度量, 它反映了图像灰度曲面的粗糙程度。

分形描述的不是几个像素间的灰度关系, 而是相对较大区域内的所有像素的平均统计特性。在图像处理中引入分形理论, 正是为了引入这种对图像相对宏观描述的方法。广义而言, 任何物体表面都可以看做是由某种纹理特征的表面构成, 故任何图像都是包含了若干纹理区域的灰度表面, 而纹理特征的变化包含了图像的边缘信息。这些不同纹理灰度表面之间灰度起伏变化显著, 外在就表现为边缘。Pentland 通过对自然景物纹理图像的研究, 证明了自然界中大多数物体表面影射成的灰度图像是具有相同分形特征的分形表面。且大多数自然景物的灰度图像是满足各向同性 DFBR 场模型的。既然图像表面统计特性满足各向同性的分数布朗随机场, 而在不同的区域内分形特征参数 H 值会发生奇异转变, 那么利用分形特征参数 H 值的奇异转变可以用作图像的边缘检测。

选取一块 $N \times N$ 区域的图像区域, 图像区域中某一点像素的灰度强度用 $F(x, y)$ 表示, 因为图像灰度场满足离散分数布朗随机场, 因此有

$$E[|F(x_2, y_2) - F(x_1, y_1)|] = k[\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}]^H$$

令

$$\Delta F_{\Delta r} = |F(x_2, y_2) - F(x_1, y_1)|, \Delta r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

则有

$$E(\Delta F_{\Delta r}) = k \times \Delta r^H$$

等式两边取对数:

$$\log[E(\Delta F_{\Delta r})] = H \times \log(\Delta r) + C$$

$$E(\Delta F_{\Delta r}) = \frac{\sum_{x_1=0}^{M-1} \sum_{y_1=0}^{M-1} \sum_{x_2=0}^{M-1} \sum_{y_2=0}^{M-1} (|F(x_2, y_2) - F(x_1, y_1)|)}{P_n(k)}$$

式中 H ——分形维特征参数;

$\Delta F_{\Delta r}$ ——图像区域中两像素点灰度值差的绝对值;

Δr ——图像区域中所有可能的像素点对之间的距离;

$P_n(k)$ ——某一特定 Δr 距离的所有像素点对的数目;

C ——常数。

这样, 在图像区域中任意指定一个像素点对的距离, 就能够得到一对数据 $(\log[E(\Delta F_{\Delta r})], \log(\Delta r))$, 通过最小二乘法对图像区域中所有距离对应的数据进行拟合, 就能够得到该图像区域

中心像素的分形特征参数 H 。由于 DFBR 场具有自仿射分形特征, 因而一定有 $0 < H < 1$, 而且 Hurst 指数 H ($0 < H < 1$) 越小, 像素的表面越粗糙。但是图像若存在于不同的区域就破坏了 DFBR 场的一致性, 因而会出现 H 值得奇数即 $H > 1$ 的情况。

由 Hurst 指数可以得到图像表面的分形维数 $D = D_T + 1 - H$ 。其中 D_T 为图像表面的拓扑维数, 由于拍摄到的图片为平面图像, 故其拓扑维数为 2, 因此分形维数 $D = 3 - H$ 。

采用 3×3 的模板, 将模板自左到右、自上到下遍历整幅图片就可以得到整个图像中所有像素的分形维数, 然后根据 H 值的奇异转变确定图像的边缘。在计算 H 参数时, 模版不宜太大, 如采用 5×5 的模板边缘检测的结果将遗漏较多的重要细节, 一般取 3×3 的模板即可。

图 5-3-27 所示为 TIG 焊熔池图像边缘提取的整个过程所得到的图片。图 5-3-27a 为熔池原始图像; 图 5-3-27b 为运用分形中 DFBR 场理论通过分形特征参数 H 值的奇异转变提取到的图像边缘, 由图可以看出熔池的边缘已经基本提取出来了。由此可见在对原始图像不进行预处理的情况下, 分形理论中的 DFBR 场理论能够很好地提取到图像的边缘。

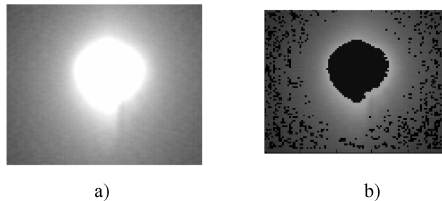


图 5-3-27 TIG 焊熔池图像边缘提取过程
a) 原始图像 b) DFBR 检测结果

3.2.3 数学形态学分析及其在焊接中的应用

数学形态学 (Mathematical Morphology) 是研究数字图像形态结构特征与快速并行处理方法的理论, 是通过对目标图像的形态变换来实现结构分析和特征提取的目的。数学形态学自 1964 年由 Matheron 和 Serra 提出, 而后逐渐发展成为一门较为成熟的数学分支, 并逐渐成为图像集合特征分析与处理的有力工具。特别是数学形态学中的基于集合的数学理论, 使图像的分析 and 处理从线性到非线性算法的探讨具备了更加坚实的理论基础。自 20 世纪 90 年代中期以来, 小波变换、模糊逻辑、多尺度分析等理论先后与数学形态学融合形成非线性分析工具渐成研究热点。

数学形态学摒弃了传统意义上用数值分析和建模来处理图像的观点, 是一种基于集合观点的非线性图像处理与分析理论, 其运算是在集合基础上定义的, 图像全部都以合理的方式转换为集合。因此, 数学形态学算子的性能将主要以几何的方式进行刻画, 这种显式的几何描述特点更适合视觉信息的处理和分析。数学形态学的基本思想是利用结构元素去探测图像, 看它是否能够将这个结构元素很好地填放在图像的內部, 同时验证填放结构元素的方法是否有效。由于数学形态学的非线性特点, 近年来在抑制噪声、特征提取、边缘检测、图像分割、形状识别、骨架化、纹理分析、颗粒分析、图像增强与恢复、图像压缩等所有图像处理领域都展示了极为美好和广阔的应用前景。数学形态学能将大量的复杂图像处理转换为基本的逻辑和移位运算的组合来完成, 其运算速度非常快, 用于图像处理效率很高, 便于并行处理和硬件实现, 非常适于实时过程控制。

数学形态学最早的研究对象就是二值图像, 称为二值形态学。二值图像处理中, 数学形态学通过结构元素在图像范围内平移, 同时施加交、并等基本集合运算来探测和分析所研究的图像。“探针”, 即“结构元素”, 也是一个集合, 它的具体形状依据分析的目的来决定。结构元素可以是线形、三角形、圆形、球形以及由基本的几何结构组合而成的不大于被探测图像的任意形状和尺度的结构。二值图像基本的形态学变换有 4 种, 分别是腐蚀 (Erosion)、膨胀 (Dilation)、开运算 (Open) 和闭运算 (Close)。

1. 二值图像的腐蚀运算

腐蚀是数学形态学的基本运算。它的实现是基于填充结构元素的概念。利用结构元素填充的过程,取决于一个基本的欧氏空间运算——平移。将一个集合 A 平移距离 x 可以表示为 $A+x$, 其定义为

$$A+x = \{a+x; a \in A\} \quad (5-3-9)$$

如图 5-3-28 所示,从几何上看 $A+x$ 表示 A 沿矢量 x 平移了一段距离。探测的目的就是标记出图像内部那些可以将结构元素填入的平移位置。

集合 X 被集合 S 腐蚀,表示为 $X \ominus S$, 其定义为

$$X \ominus S = \{x; S+x \subset X\} \quad (5-3-10)$$

其中, $\subset$ 表示子集的关系。腐蚀还可以用 $E(X, S)$, (X, S) 和 $ERODE(X, S)$ 来表示。其中 X 为输入图像, S 为结构元素。如果结构元素包括原点,则腐蚀具有收缩图像的作用。

对一个给定目标图像 X 和一个结构元素 S , 将 S 在图像上移动。在每一个当前位置 x , $S[x]$ 只有以下 3 种可能状态:

- 1) $S[x] \subseteq X$ 。
- 2) $S[x] \subseteq X^c$ 。
- 3) $S[x] \cap X$ 和 $S[x] \cap X^c$ 均不为空。

第一种情形说明 $S[x]$ 与 X 最大相关; 第二种情形说明 $S[x]$ 与 X 不相关; 第三种情形说明 $S[x]$ 与 X 只是部分相关。

满足 (1) 的 x 的全体构成了结构元素与图像的最大相关点集, 这个集合称为 S 对 X 的腐蚀, 记为 $X \ominus S$:

$$X \ominus S = \{x \mid S[x] \subseteq X\} \quad (5-3-11)$$

腐蚀可以看做是将图像 X 中每一个与结构元素 S 全等的子集 $S[x]$ 收缩为点 x , 腐蚀在数学形态学运算中的作用是消除物体边缘点。如图 5-3-29 所示, 腐蚀运算的过程: 逐步地平移结构元素, 且仅当结构元素完全包含于物体内时, 当前的平移点才可归入腐蚀后的物体中。

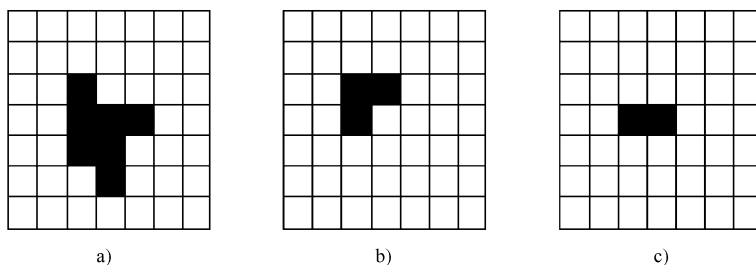


图 5-3-29 腐蚀算法示意图

a) 原始图像 b) 结构元素 c) 腐蚀后的图像

2. 二值图像的膨胀运算

膨胀是腐蚀的对偶运算, 可以通过补集来定义。 X 被 S 膨胀可以表示为 $X \oplus S$, 其定义为

$$X \oplus S = [X^c \ominus (-S)]^c \quad (5-3-12)$$

其中, X^c 表示 X 的补集。为了利用 S 膨胀 X , 可将 S 相对原点旋转 180° 得到 $-S$, 在利用 $-S$ 对

X 进行腐蚀运算, 则腐蚀结果的补集便是所求的结果。膨胀运算具有扩大图像的作用, 膨胀可以看做将图像 X 中的每一个点 x 扩大为 $S[x]$ 。

腐蚀运算是将图像 X 中每一个与结构元素 S 全等的子集 $S[x]$ 收缩为点 x 。反之, 也可以将 X 中的每一个点 x 扩大为 $S[x]$ 。这就是膨胀运算, 记为 $X \oplus S$, 其定义为

$$X \oplus S = \{x \mid S[x] \cap x \neq \emptyset\} \quad (5-3-13)$$

等价于

$$X \oplus S = \bigcup \{X[s] \mid s \in S\} \quad (5-3-14)$$

$$X \oplus S = \bigcup \{S[x] \mid x \in X\} \quad (5-3-15)$$

如图 5-3-30 所示, 膨胀运算的过程: 将结构元素进行反射, 逐步地平移结构元素, 如果它与物体相交不为空, 则当前的平移点归入形态学腐蚀后的物体。

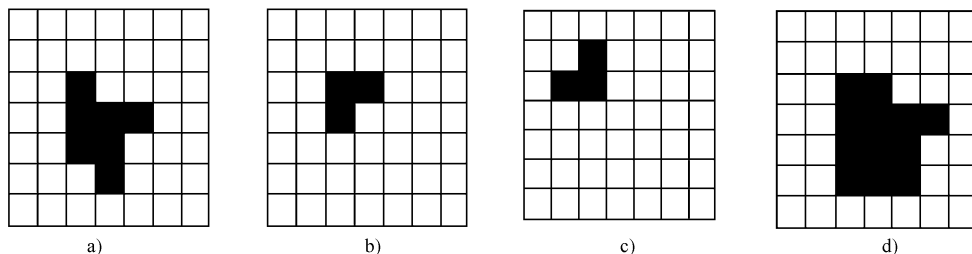


图 5-3-30 膨胀算法示意图

a) 原始图像 b) 结构元素 c) 结构元素反射 d) 膨胀后图像

在形态学中除了腐蚀和膨胀两种基本的运算外, 还有两种重要的二次运算, 即形态学的开运算和闭运算。虽然开、闭运算是以腐蚀和膨胀定义的, 但是, 从结构元素的填充角度来看, 它具有更为直观的几何形式, 这也是二值形态学应用的基础。

3. 二值图像的开运算

利用结构元素 S 对图像 X 作开运算, 其实就是先做腐蚀然后做膨胀, 用符号 $X \circ S$ 表示, 其定义为

$$X \circ S = (X \ominus S) \oplus S \quad (5-3-16)$$

开运算还可以用其他的符号表示, 如 $O(X, S)$, $OPEN(X, S)$ 和 X_s 。为了更好地理解开运算在图像处理中的作用, 有下面的等价公式:

$$X \circ S = \bigcup \{S + x; S + x \subset X\} \quad (5-3-17)$$

式 (5-3-17) 表示, 开运算可以通过计算所有可以填入图像内部的结构元素平移的并集求得。即对每一个可以填入位置作标记, 计算结构元素平移到每一个标记位置的并, 便可以得到开运算的结果。事实上, 这正是先做腐蚀, 然后做膨胀运算的结果。开运算具有磨光图像外边界的作用。先腐蚀后膨胀所描述的开运算如图 5-3-31 所示。

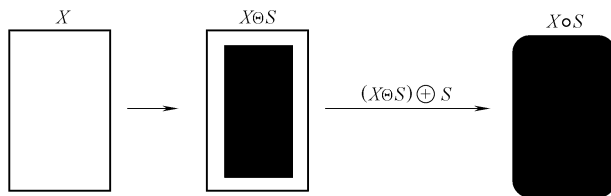


图 5-3-31 开运算示意图

4. 二值图像的闭运算

闭运算是开运算的对偶运算, 定义为先做膨胀然后做腐蚀。闭运算具有磨光图像内边界的作用。利用 S 对 X 作闭运算表示为 $X \cdot S$, 其定义为

$$X \cdot S = [X \oplus (-S)] \ominus (-S) \quad (5-3-18)$$

闭运算还可以表示为 $C(X, S)$, $CLOSE(X, S)$ 和 X^s 。闭运算满足下面的关系:

$$X \cdot S = (X^c \cdot S)^c \quad (5-3-19)$$

5. 灰度形态学

数学形态学是研究数字图像形态结构特征与快速并行处理方法的理论, 是通过对目标图像的形态变换来实现结构分析和特征提取的目的。二值形态学是数学形态学在图形领域最初取得的研究结果, 但是在实际应用中, 往往会遇到很多灰度图形, 直接使用二值形态学的算法显然是不行的。于是人们提出了很多有关灰度形态学的有效算法, 使得形态学在图像处理中的应用日益广泛和重要。灰度形态学研究的主要对象是灰度图像, 一般用定义在欧氏空间 R^n 上的一个实值函数 $f(x)$ 来描述。灰度形态学是二值形态学的自然扩展, 但是, 对于二值形态学而言, 由于它是基于集合运算的, 这一表象在灰度形态学中不能直接使用。因此, 后人建立的灰度形态学理论必须将函数转化为集合来处理。转化方法一般有两种, 即截集 (Cross Section) 变换和伞顶 (Umbrella Top) 变换。

建立灰度形态学变换是指将二值形态学中的交、并运算, 分别用灰度形态学中最大、最小极值运算来代替, 而灰度形态学的腐蚀和膨胀过程则可直接从图像和结构元素的灰度级函数计算出来。

与二值形态学一样, 灰度形态学的基本运算也有 4 个, 分别为膨胀运算、腐蚀运算、开运算和闭运算。设 $f(x)$ 为灰度图像的灰度函数, $s(x)$ 为结构元素 [其中 $f(x) \in R$, $s(x) \in R$, $x \in Z^2$], 而 D_f 和 D_s ($D_f \subset R^n$, $D_s \subset R^n$) 分别为函数 $f(x)$ 、 $s(x)$ 的定义域, 则 $f(x)$ 关于 $s(x)$ 的主要灰度形态学变换定义如下:

(1) 灰度膨胀 灰度函数 $f(x)$ 被结构元素 $s(x)$ 膨胀, 表示为 $f \oplus s$, 其定义为

$$f \oplus s = \max \{f(x+u) + s(u) : u \in D_s, (x+u) \in D_f\} \quad (5-3-20)$$

(2) 灰度腐蚀 灰度函数 $f(x)$ 被结构元素 $s(x)$ 腐蚀, 表示为 $f \ominus s$, 其定义为

$$f \ominus s = \min \{f(x+u) - s(u) : u \in D_s, (x+u) \in D_f\} \quad (5-3-21)$$

另外灰度形态学变换也可以用伞变换来定义。灰度图像 $f(x)$ 的伞变换 $U[f(x)]$ 可以表示为 $U[f(x)] = \{(x, t) \in Z^2; f(x) \geq t\}$, 其逆变换——顶变换 $T[U(f)]$ 定义为: $T[U(f)] = f(x) - \max \{t \in Z; (x, t) \in U[f(x)]\}$ 。于是灰度形态学膨胀与腐蚀可以分别表示如下。

膨胀运算的伞变换表示为

$$f \oplus s = T[U(f) \oplus U(s)] \quad (5-3-22)$$

腐蚀运算的伞变换表示为

$$f \ominus s = T[U(f) \ominus U(s)] \quad (5-3-23)$$

(3) 灰度开运算 结构元素 $s(x)$ 对灰度函数 $f(x)$ 作开运算, 表示为 $f \cdot s$, 其定义为

$$f \cdot s = (f \ominus s) \oplus s \quad (5-3-24)$$

(4) 灰度闭运算 结构元素 $s(x)$ 对灰度函数 $f(x)$ 作闭运算, 表示为 $f \cdot s$, 其定义为

$$f \cdot s = (f \oplus s) \ominus s \quad (5-3-25)$$

一般称上述形态变换为函数关于结构元素的变换。

不难看出, 如果采用扁平结构元素的灰度形态学变换, 实际上就是图像在滑动窗口中的极值运算, 这样就使得变换更容易实现。

3.2.4 其他信号分析方法及其应用

在数字信号处理新技术中, 除了上述小波分析、分形理论和数学形态学外, 还有几种有效的信号处理方法, 包括独立分量分析、经验模态分解、进化计算、混沌计算等, 此外, 模糊逻辑和神经网络除了用于过程控制等外, 用于数字信号处理也非常有效。

经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 是由美国国家宇航局的华裔科学家 Norden E. Huang 博士于 1998 年提出的一种新的处理非平稳信号的方法——希尔伯特—黄变换 (Hilbert-Huang transform, HHT) 的重要组成部分。基于 EMD 的视频分析方法既适合于非线性、非平稳信号的分析, 也适合于线性、平稳信号的分析, 并且对于线性、平稳信号的分析也比其他的时域分析方法更好地反映了信号的物理意义。EMD 算法本质上是一种将时域信号按频域尺度分解的数值算法, 其结果是将信号中的不同尺度的波动或趋势逐级分解出来, 产生一系列具有不同特征尺度的固有模态函数。

EMD 方法将一个复杂的信号分解为若干固有模态函数之和, 它基于以下基本假设: 任何复杂的信号都由一些不同的固有模态函数分量 (Intrinsic mode function, IMF) 组成, 每个固有模态函数无论是线性的、非线性的还是非平稳的, 都具有相同数量的极值点和过零点, 在相邻的两个过零点之间只有一个极值点, 同时上下包络线关于时间轴局部对称, 任何两个模态之间是相互独立的。在此假设基础上, 可用 EMD 对任何信号进行分解。固有模态函数必须满足以下两个条件:

- 1) 曲线的极值点和零点的数目相等或至多相差 1。
- 2) 在曲线的任意一点, 包络的最大极值点和最小极值点的均值等于零。

EMD 可以对一个时间序列进行分解, 先分解出的 IMF 分量是时间尺度最小的分量, 最后分解出的 IMF 分量是时间尺度最大。

独立分量分析 (Independent component analysis, ICA) 是指从多个源信号的线性混合信号中分离出源信号的技术。除了已知源信号是统计独立外, 无其他先验知识, ICA 是伴随着盲信源问题发展起来的, 故又称为盲分离。

ICA 方法是基于信源之间的相互统计独立性, 与传统的滤波方法和累加平均方法相比, ICA 在消除噪声的同时, 对其他信号的细节几乎没有破坏, 且去噪性能也往往要比传统的滤波方法好很多。

ICA 可由如下方程描述:

$$x(t) = As(t) \quad (5-3-26)$$

式中, $s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T$, 为 n 个源信号构成的 n 维向量;

$x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T$, 为 m 维观测数据向量, 其各元素是传感器的输出, $m \times n$ 维矩阵是混合矩阵。

ICA 是在混合矩阵 A 和源信号未知的情况下, 只根据观测数据向量 $x(t)$ 确定分离矩阵 W , 使得变换后的输出为:

$$y(t) = Wx(t) \quad (5-3-27)$$

是源信号向量 $s(t)$ 的拷贝或估计, 且输出分量 $y_i(t)$ 尽可能统计独立。

ICA 由观测信号及对源信号的概率分布的估计来确定源, 可有效避免因提高信噪比而产生的缺陷等。ICA 可在语音信号分离、生物医学信号处理、金融数据分析、图像消噪、远程通信、人脸识别等方面有重要应用价值。

1975 年密执安大学教授 Holland 及其学生, 基于达尔文的生物进化论和孟德尔的遗传学说创立了遗传算法; 1985 年以来, 国际上召开多次遗传算法的学术会议和研讨会; 遗传算法成功用于工业设计、交通运输、经济管理等领域, 如可靠性优化、流水车间调度、设备布局、图像处理以及数据挖掘。

遗传算法的原理与传统的搜索算法不同, 遗传算法从一组随机产生的初始解 (称为群体), 开始搜索过程。群体中每个个体是问题的一个解, 称为染色体。这些染色体在后续迭代中不断进化, 称为遗传。遗传算法通过交叉、变异、选择运算实现。交叉或变异运算生成下一代染色体, 称为后代。染色体的好坏用适用度来衡量。根据适应度从上一代和后代中选择一定数量的个体, 作为下一

代的群体,再继续进化,经过若干代进化后,算法收敛于最好的染色体,这可能就是最优解或次优解。遗传算法的理论如下:

- 1) 遗传算法的编码策略、全局收敛和搜索效率的数学基础。
- 2) 遗传算法的新结构、基因操作策略及性能。
- 3) 遗传算法参数的选择及与其他算法的综合。

混沌是“无序中的有序”,有序是指有确定性,无序是最终结果的不可预测性。非线性、非平衡性、确定性、动态性、内随机性、初值敏感性、时间序列的不规则性和有奇异吸引子的必要条件。刻画混沌动力学性质常用 Lyapunov 指数和熵。混沌系统介于严格的规则性和随机性之间,混沌系统可在许多不同的行为方式之间转换,特别灵活。一个混沌系统的行为是许多有序行为的集合,但每一个行为在正常情况下都不占主导地位,通过施加扰动可使其中一个有序行为起作用。混沌可用于混沌控制、医学中的心律分析、通信中的信息压缩和保密、计算机网络和家电控制等。

混沌吸引子有无数嵌入不稳定轨道,通过扰动使之稳定,系统就是可预测和可控制的;混沌控制多与时间序列有关,可利用时间序列可控制不希望的扰动产生的影响。

混沌系统的整体是确定的,如果两个几乎相同的具有适当形态的混沌系统受到一种信号激励,它也会产生相同的输出。混沌同步的子系统可以位于任何地方,这就可以用混沌通信来传递隐藏的信息。从原系统取得一个混沌电压信号,加上要传递的信息,接受者可以去掉混沌部分而获得有用的信息。

3.3 焊接熔透的自动控制

熔透控制系统的主要目的是通过在线地、实时地调整熔宽闭环模糊 PID 控制器的参数,使其适应焊接过程中由于各种原因变化引起的对象特征的变化,从而使控制器始终保持较高的控制精度,实现恒熔宽焊接。

在非熔化极的 TIG 焊工艺中,焊接电流和焊接速度对焊接过程的熔池尺寸影响最大。其中焊接速度由焊接工件在工作台的速度决定,焊接电流由 TIG 焊机的给定电压决定。给定电压越大,焊接电流增加,熔池宽度就越大;工作台运动速度越慢,熔池宽度越大。在明确以上两个因素对熔池的影响后,设计一个低成本的熔透控制器。首先必须要分析整个系统的工作过程,即首先要明确系统的属性、控制对象、输入输出量和偏差控制量等的处理,其次要选择采用怎样的控制算法才能实现比较高的熔透控制精度。重点对 TIG 的熔透控制进行了试验研究。

在 MAG 焊等熔化极气体保护焊中,影响熔透的工艺因素多而复杂,焊接电流、电弧电压、焊接速度、气体成分及流量、焊丝和工件的材质等都会使焊缝的熔透情况发生改变。与非熔化极的 TIG 焊相比,熔化极焊接的现场图像采集条件非常恶劣,又存在短路过渡而使得弧光变得很不稳定,熔池的形态变化也很大;而飞溅和烟尘等干扰使熔池图像变得模糊不清。此外,在熔化极焊接中,在没有实现一元化调节的情况下,焊接电流和电弧电压需要相互配合才能实现正常焊接,因此不能像 TIG 焊那样采用单一调节焊接电流来实现熔透控制。

3.3.1 熔池图像处理

在弧焊过程熔透自动控制系统中,熔池边缘信息的实时提取和熔宽的计算是最关键的部分。提取熔池边缘信息,检测熔池宽度,并在熔透控制过程中始终保持熔宽不变,这是在焊接质量控制中的最终目的。因此,如何在图像处理的过程中消除噪声,去除干扰,采用有效的边缘检测手段,得到准确的熔池边缘并计算熔宽,将是影响整个熔透控制系统控制效果好坏的决定因素。数学形态学用于焊接过程图像处理,既可提供多方面的图像处理技术,又可满足其实时性高的严格要求。形态学滤波利用不同结构元素的开闭运算可以去除图像的内部和外部随机噪声如弧光、飞溅等,并能精确地保持其细

节特征；形态学梯度可快速准确地检测出熔池边缘特征，从而实现弧焊过程的熔透控制。

在焊接过程中，由于焊接工艺、焊接材料不同，所采集到的熔池 CCD 图像中所包含的信息也就有很大的差别，因此对于不同的焊接熔池图像应该采用不同的数学形态学算法。

TIG 焊对于其他的焊接方式而言，突出的优点是：采用惰性气体作为保护气体，保护作用极好，几乎可以焊接所有金属，应用面广。因此，TIG 焊有着很好应用前景。而在 TIG 焊焊接过程中并没有外加送丝系统，在熔池区的飞溅和烟尘的影响很小，所以焊接熔池灰度图像可以简化为二值图像，可以采用二值形态学的分析方法。在焊接领域，近些年来也有很多采用二值形态学进行图像处理的实例。如采用二值形态学的腐蚀和膨胀法对原始图像进行去噪处理；基于二值形态学的形心提取算法以解决机器人视觉引导中目标点定位等。针对 TIG 焊图像的特点，从数学形态学的理论出发，对二值焊接图像做了试验分析，希望找到有效的特征提取和边缘检测方法。

首先，对 TIG 焊熔池图像进行二值化操作。CCD 原始图像为灰度图像，像素值范围为 0 ~ 255，必须转化为二值图像，即像素值只有 0、1 两个。因此，必须选择一个阈值，大于这个阈值的像素值为 1，反之则像素值为 0。二值化后，才可以进行下面的二值形态学处理。

依据上面的膨胀、腐蚀定义，可以写出具体的算法。

二值腐蚀算法实现的步骤如下：

① 输入图像，从图像颜色索引表中获取数据。由于图像只有黑白两种颜色，因而只需对颜色索引表的索引值进行操作即可。

② 设置结构元素。由于索引值只能为 0 或者 1，因而结构元素的值可以为 1 或 0。

③ 平移结构元素，按如下公式计算当前平移点处的值：

$$\begin{cases} 0, & \text{当存在一个 } i \text{ 使 } (A_i \& B_i) = 0 \text{ 成立} \\ 1, & \text{所有的 } (A_i \& B_i) \text{ 均等于 } 1 \end{cases}$$

其中，分别表示：结构元素 B 的第 i 个分量所对应的物体 A 的颜色索引值；结构元素 B 的第 i 个分量位置的元素值。

类似地，二值图像膨胀的计算步骤如下：

① 从颜色索引表中获取颜色数据。

② 设置结构元素。

③ 按照下面的公式计算当前平移点处的值：

$$\begin{cases} 0, & \text{当存在一个 } i \text{ 使 } (A_i \& B_i) = 1 \text{ 成立；} \\ 1, & \text{所有的 } (A_i \& B_i) \text{ 均等于 } 0 \end{cases}$$

以上述两个基本运算为基础，接下来便可以做开运算和闭运算，然后进行边缘提取，在这个算法里，提供了多种边缘提取的方式：

其中，外边界的算法为

$$(A \oplus B) \setminus A \quad (5-3-28)$$

内边界的算法为

$$A \setminus (A \odot B) \quad (5-3-29)$$

梯度算法为

$$(A \oplus B) \setminus (A \odot B) \quad (5-3-30)$$

总体的二值形态学图像处理算法框图如图 5-3-32 所示。在此算法框图中，为了保证在处理时能够自动地选

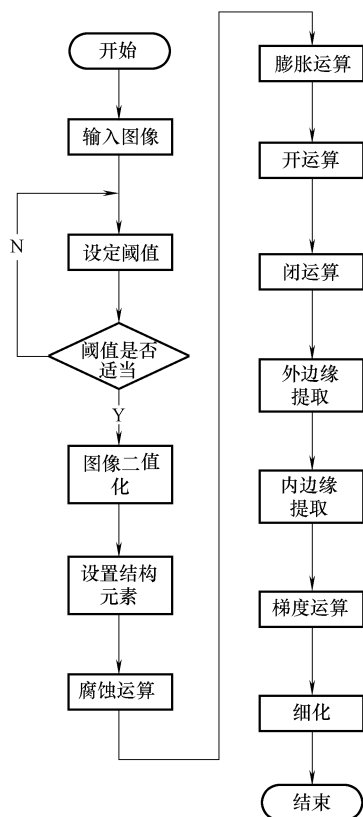


图 5-3-32 二值形态学图像处理算法框图

择最优阈值，使得灰度图像二值化时不会丢失主要的焊缝信息，特别加入了二值化的阈值自适应算法。

在弧焊过程的熔透自动控制中，控制对象就是焊接熔池的宽度，控制目标就是保持熔宽在整个焊接过程中始终保持不变，这样才能使焊缝成形美观。

用数学形态学算法成功地提取出弧焊过程的熔池边缘后，就可以很方便地计算出熔池的相关信息。采用图 5-3-33 中所示的方法计算出熔池的宽度。

为了方便熔池宽度的计算，熔池边缘的图像已经经过二值化处理，熔池边缘的像素灰度值为 255，而周围的像素灰度值均为 0。采用逐行扫描的方法，对熔池边缘图像进行从左向右扫描，图 5-3-33 中的虚线 $a \sim g$ 均表示扫描线。在每一次扫描过程中，从第一个灰度值为 255 的像素点开始记录，直到出现下一个灰度值为 255 的像素点为止记录结束，这其中的宽度即为当前扫描行的熔池宽度，若是在当前扫描行中出现多于 2 个像素点的灰度值是 255，则说明当前行出现了噪声点，这时将当前所测宽度和前一行相比较，然后取最接近值。当所有行扫描结束后，取宽度最大的一行作为熔宽所在行，这一行的宽度像素值即为所需的熔池宽度。

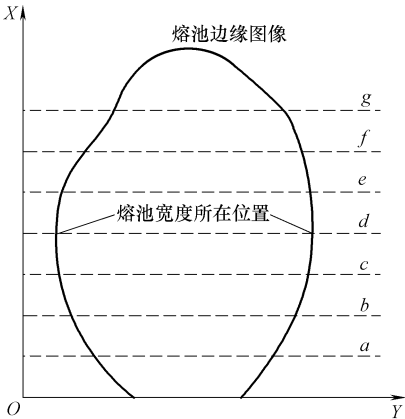


图 5-3-33 熔宽的计算方法

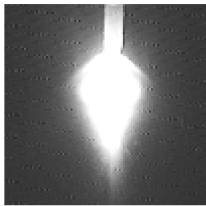
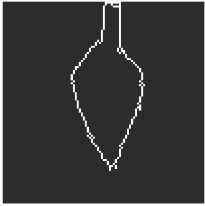
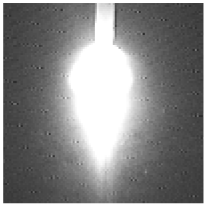
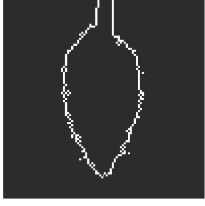
熔池长度的计算也可以采用类似计算熔宽的方法，只需将行扫描改成列扫描，其他步骤不变，就可以得到熔池长度的像素值。熔池的面积可以理解为熔池内部所有像素的总和，因此将行扫描中的每一行的像素值叠加，其结果就是整个熔池面积的像素值。

表 5-3-1 为 TIG 焊过程中 4 种不同工艺参数条件下得到的典型熔池图像，采用二值形态学图像处理算法得到的熔池边缘，已经在此熔池边缘基础上得到的熔池宽度、长度和面积。

表 5-3-1 TIG 焊过程典型熔池图像及其参数分析

TIG 焊 试验参数	典型熔池图像	熔池边缘提取	熔池宽 度(像素)	熔池长 度(像素)	熔池面 积(像素)
焊接速度:0.5m/min 控制电压:1.6V			27	52	781
焊接速度:0.3m/min 控制电压:1.6V			34	81	1484

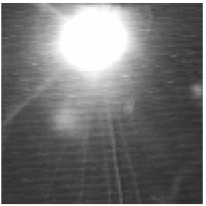
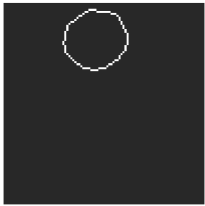
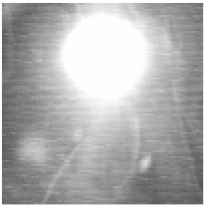
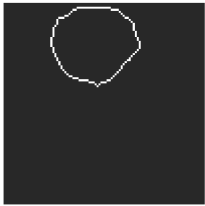
(续)

TIG 焊 试验参数	典型熔池图像	熔池边缘提取	熔池宽 度(像素)	熔池长 度(像素)	熔池面 积(像素)
焊接速度:0.3m/min 控制电压:1.8V			38	83	1748
焊接速度:0.5m/min 控制电压:1.8V			44	90	2467

从表 5-3-1 可以看出，在不同焊接速度和控制电压的情况下，虽然 TIG 焊过程的熔池形状不同，采用二值形态学处理方法可以得到的熔池边缘均很清晰，熔池宽度、长度和面积的计算也很准确。但是由于采用的是图像直接二值化的处理，有些亮度非常高的弧光会被误判成熔池，造成熔池边缘的提取比实际熔池略大。可以采用改变阈值的方法来调整二值化的熔池效果，这样就可以得到准确的熔池边缘信息。

表 5-3-2 为 MAG 焊过程中 3 种不同焊接参数下得到的典型熔池图像，在经过必要的预处理算法处理后，再采用灰度形态学图像处理算法得到的熔池边缘及熔池宽度、长度和面积。

表 5-3-2 MAG 焊过程典型熔池图像及其参数分析

MAG 焊 试验参数	典型熔池图像	熔池边缘提取	熔池宽 度(像素)	熔池长 度(像素)	熔池面 积(像素)
焊接速度:0.3m/min 焊接电压:18V 焊接电流:80A			35	37	962
焊接速度:0.4m/min 焊接电压:19V 焊接电流:110A			44	43	1255
焊接速度:0.6m/min 焊接电压:20V 焊接电流:140A			47	42	1364

在表 5-3-2 中，采用了 3 种焊接效果较好的焊接参数进行试验，从 MAG 焊过程的熔池图像可以看出，在不同焊接速度、焊接电压和焊接电流下，熔池形状有很大的差异。使用灰度形态学方法处理 MAG 焊熔池图像，检测出的熔池边缘完整、清晰，飞溅和弧光噪声都得到了很好的抑制。由于在前期处理中没有采用图像二值化的处理，基本没有出现误判的情况。计算出的熔池宽度、长度和面积也很准确，有效地提取出了熔池边缘信息。

从表 5-3-1 和表 5-3-2 可知，数学形态学算法可以准确有效地提取焊接图像的特征信息，在此基础上进行熔池宽度、长度和面积的计算将非常简单。

3.3.2 熔透控制算法

在 TIG 焊熔透控制系统中，控制器采用的是模糊 PID 控制方法，这种控制系统在焊接过程中具有自校正控制的功能。对于这个模糊 PID 控制器的设计，首先要确定它的控制周期。在本系统中，控制周期是由 CCD 采集图像的速度和系统精度要求来决定的，经过试验比较，把控制周期定在 100ms。

控制中每 100ms 采样一次熔池图像，进行图像处理，计算熔池宽度、长度和面积，并根据不同权重（其中熔宽的权重最大），对上述三数值进行叠加，获得的熔池表征值与给定值进行比较，作为偏差输入到模糊 PID 控制器中，输出得到控制电压，这个控制电压作为焊机的给定电压以控制焊接电流，最终达到熔透控制的目的。

在实际的熔透控制过程中，由于所使用的焊机起弧不太可靠，试验过程需要人工参与起弧，因此起弧过程不稳定，熔池的宽度也没有规律性，不能作为熔宽的参考值。为了实现平稳控制，在试验中，起弧和收弧的过程是不在控制中的。熔透控制是在起弧稳定后开始的，为了保证控制的准确性，取前 10 个周期的熔宽平均值作为整个控制过程的熔宽参考值。

固定参数 PID 控制算法的程序设计相对虽然比较简单，并且应用领域非常广泛，非常成熟，但是系统的参数整定必须适当才会得到比较好的控制效果。但在实际焊接过程中，有很多的干扰因素存在，如果仅用固定参数的 PID 控制算法，控制效果不一定会很理想，因此，在 PID 控制算法的基础上，引入了模糊逻辑，构成了模糊 PID 控制算法。该控制算法采用模糊控制规则，对每次的 PID 控制参数变量进行在线修改，这样就可以保证得到的控制参数才是最佳的，从而提高整个系统的控制精度，控制效果自然也就很好。试验中采用的是参数自调整的模糊控制，以使系统具有自适应性。同时为了提高稳态精度，采用将偏差的积分与模糊控制并联的结构。控制结构框图如图 5-3-34 所示。

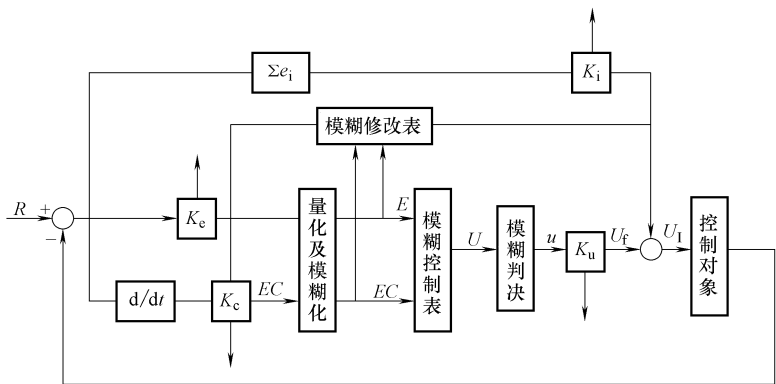


图 5-3-34 参数自调整模糊 PID 控制结构框图

设 E 、 EC 和 U 分别为误差 e ，误差变化率 Δe 和控制量的模糊语言变量。 E 、 EC 和 U 分别规定为以下模糊子集：

$$E = \{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}$$

$$EC = \{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}$$

$$U = \{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}$$

其中：NB 表示负大，NM 表示负中，NS 表示负小，0 表示零，PS 表示正小，PM 表示正中，PB 表示正大。

E 、 EC 和 U 的论域分别为

$$E = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

$$EC = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

$$U = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

各模糊子集的隶属度分别见表 5-3-1、表 5-3-2、表 5-3-3，控制经验规则采用模糊控制中常用的 Mamdani 规则，如图 5-3-34 所示。根据这些控制规则，再按照模糊控制推理合成规则进行运算，采用最大隶属度方法进行模糊判决，经过多次的试验和修改，得到最终的模糊控制表。

对于输入量 E 和 EC 的隶属度函数，在 E 或 EC 变化小时，选用高分辨率的隶属度函数以提高系统响应的灵敏度；而在偏差与偏差变化率比较大时，选用分辨率不太高的隶属度函数以增强系统响应的鲁棒性。

模糊 PID 控制参数自调整的算法是：先以原来的 K_e 和 K_c 对 e_i 和 Δe_i 进行量化，查修改表得出参数应该调整（放大或缩小）的倍数 N ，计算 $K_e = K_e N$ ， $K_c = K_c N$ ， $K_i = K_i N$ ， $K_u = K_u / N$ 。然后用新参数对 e_i 和 Δe_i 进行量化，再查控制表，求出 U 再与 $K_i \sum e_i$ 叠加，输出作用于对象。

3.3.3 TIG 焊熔透控制

为了验证所设计的图像处理和熔透控制算法的有效性和正确性，采用非熔化极的 TIG 焊工艺进行试验研究。在此基础上，通过改进图像处理和算法，将其应用到熔化极气体保护焊工艺的熔透控制中。

在进行实际的焊接过程熔透控制试验之前，还必须做大量的稳态试验，目的是测定 TIG 焊机的给定电压，焊接电流在某个确定的焊接速度下和焊接熔池宽度之间的关系，得出它们之间的关系曲线，为系统提供控制量初始值，即给定电压初始值。

利用焊接电弧动态小波分析仪同步检测焊接电流，CCD 传感器采集图像，在不同的焊接速度和焊机给定电压的条件下，分别检测了 TIG 焊的熔池宽度，各个检测参数见表 5-3-3。

表 5-3-3 不同焊接参数条件下 TIG 焊熔池宽度表

焊接速度/ (m/min)	焊接给定电压 /V	焊接平均电流 /A	熔池平均宽度 (像素)	熔池最大宽度 (像素)	熔池最小宽度 (像素)
0.3	1.6	82.09	36	37	34
0.3	1.8	91.57	39	40	37
0.4	1.6	83.53	34	35	32
0.4	1.8	89.82	37	38	35
0.5	1.6	84.01	30	32	29
0.5	1.8	90.26	33	35	32

图 5-3-35 和图 5-3-36 所示分别为相同电压不同速度下以及相同速度不同电压下 TIG 焊过程熔池图像比较的结果。

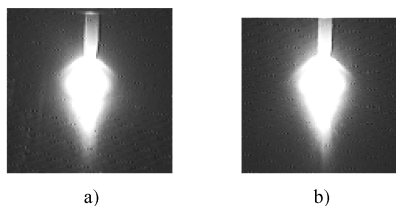


图 5-3-35 相同速度不同电压下 TIG 焊过程熔池图像比较

a) 1.6V, 0.5m/min b) 1.8V, 0.5m/min

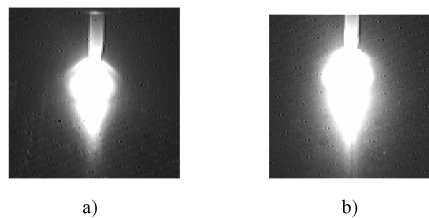


图 5-3-36 相同电压不同速度下 TIG 焊过程熔池图像比较

a) 1.6V, 0.5m/min b) 1.6V, 0.3m/min

由图 5-3-35 和图 5-3-36 可见, 控制电压越大, 熔池越大; 焊接速度越慢, 熔池也越大。由于工件两端宽, 中间窄, 在焊接过程中变形严重, 因此在进行试验之前, 首先必须将工件固定并且夹紧, 以防止严重变形。但是在实际焊接中, 虽然已经使焊缝两头刚性固定, 但由于焊缝较长, 在末段的变形还是比较严重, 有时可能会造成部分位置的未熔透。

图 5-3-37 和图 5-3-38 分别给出了突变形工件和渐变变形工件在 TIG 焊过程中给定焊接电流未加控制的效果照片, 另外还绘出了焊接过程中熔宽的变化曲线。由图中照片可以看出, 由于工件形状的改变, 焊缝形状也发生了改变。

图 5-3-37a 为正面焊接照片, 可以清楚地看到在工件形状突变位置所产生的非常明显的焊缝变宽。图 5-3-37b 为反面焊接照片, 可以清楚地看到在工件形状突变位置反面焊缝由于过度熔透而产生的明显塌陷; 同时在焊缝尾部由于工件变形, 出现了部分未熔透的情况。

另外, 从这两个图的熔池宽度变化检测曲线上可见, 虽然进行的恒流焊接, 但是由于焊机本身的干扰因素和外界的噪声干扰以及工件的散热条件的变化, 熔池宽度不能保持恒定; 在工件宽度发生突变或是渐变的位置, 熔池宽度会明显地变大。

图 5-3-39 和图 5-3-40 分别给出的是突变形工件和渐变变形工件在 TIG 焊过程中经过模糊 PID 熔透自动控制以后的焊接效果照片, 并绘出了焊接过程中熔宽的变化曲线。从图中照片的焊缝情况看, 控制效果还是十分显著的。工件两端由于手动起弧和收弧, 没有加模糊 PID 控制, 和工件中间加上模糊 PID 控制的焊缝相比, 焊缝形状有很大差异。再加上熔透闭环控制

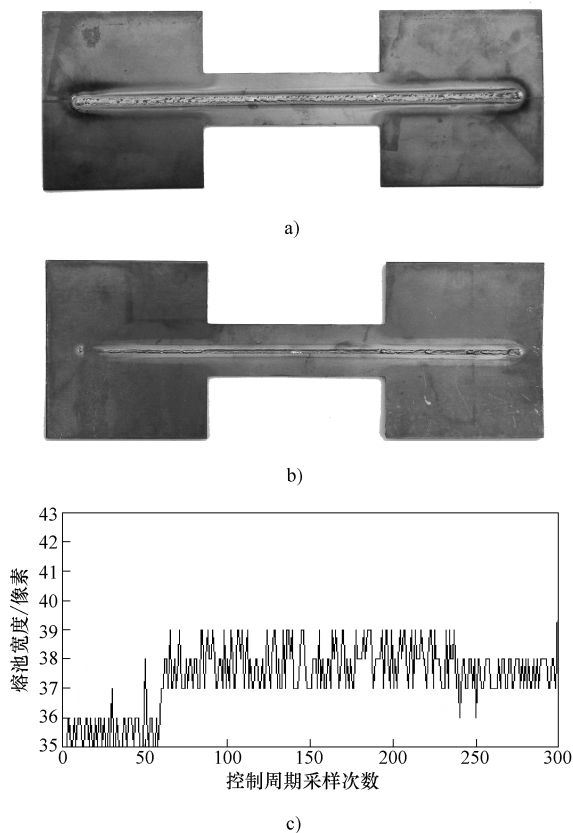


图 5-3-37 突变形工件在无熔透控制下的焊缝形状

a) 正面焊缝 b) 反面焊缝 c) 熔宽变化曲线

后的焊缝形状整齐, 而且没有因为工件变窄而出现焊缝变宽的情况, 无论是图 5-3-39 中的突变形工件还是图 5-3-40 中的渐变形工件, 正面焊缝都非常的均匀, 反面焊缝基本熔透, 熔池形状也基本一致, 在工件尾部有小量没有熔透的情况。从图 5-3-39 和图 5-3-40 中的熔池宽度变化检测曲线也可见, 在熔透闭环控制下的焊接过程稳定, 熔池宽度的变化很小, 图 5-3-40 中的熔宽最大偏差略大些, 约为 4 个像素。

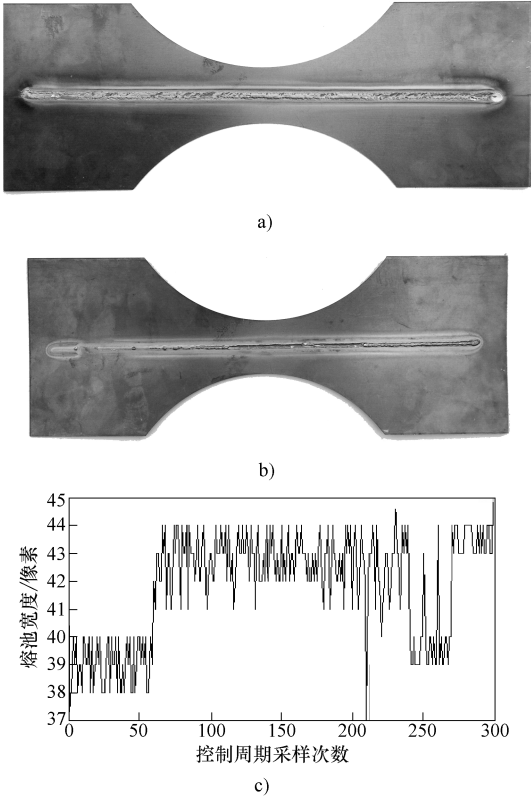


图 5-3-38 渐变形工件在无熔透控制下的焊缝形状

a) 正面焊缝 b) 反面焊缝 c) 熔宽变化曲线

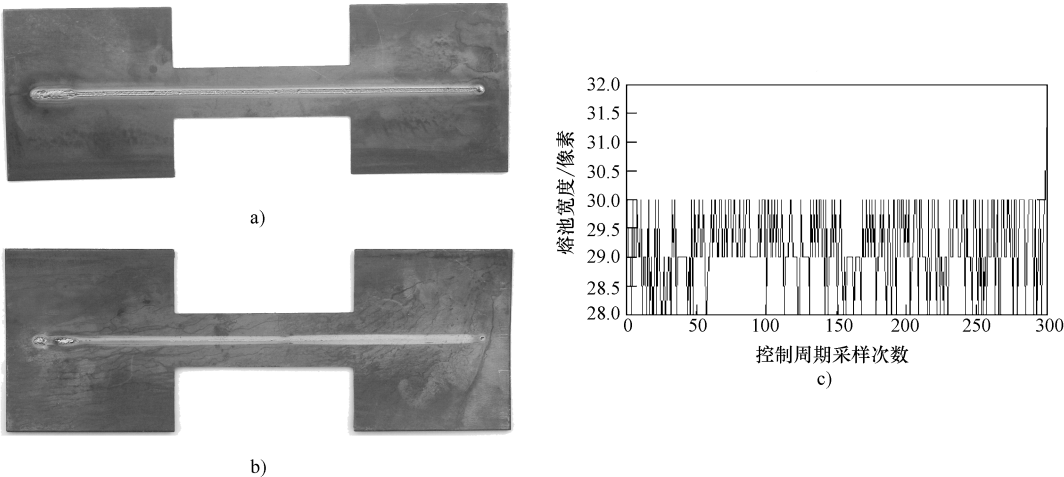


图 5-3-39 突变形工件在有熔透控制下的焊缝形状

a) 正面焊缝 b) 反面焊缝 c) 熔宽变化曲线

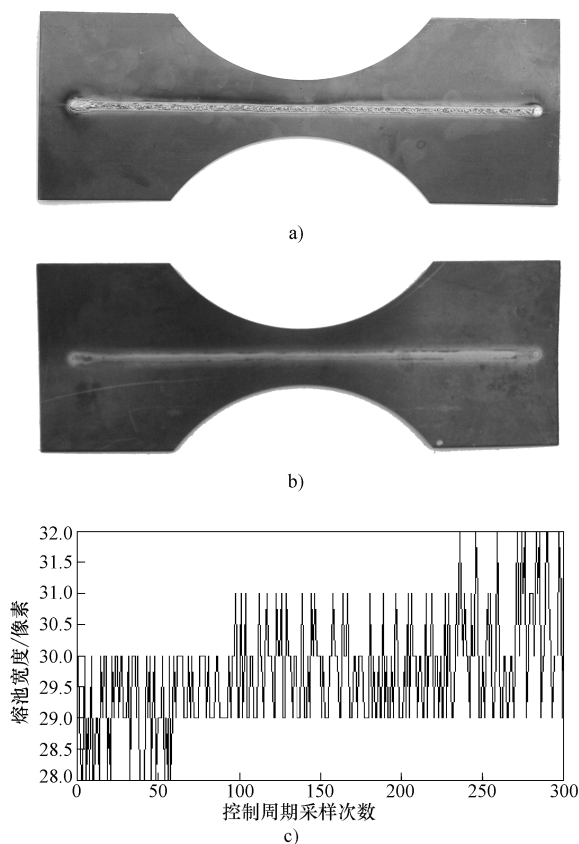


图 5-3-40 渐变形工件在熔透控制下的焊缝形状

a) 正面焊缝 b) 反面焊缝 c) 熔宽变化曲线

3.3.4 MAG 焊熔透控制

MAG 焊是典型的熔化极气体保护焊，与 CO_2 焊一样，它一般都是以短路过渡的形式进行焊接的，因此 MAG 焊的焊缝成形相对 TIG 焊过程更为复杂。近年来已经有了一些针对熔化极气体保护焊熔透控制的研究，如以焊缝背面熔池、焊接温度场或焊接速度等为控制量进行自动控制，但是总体来说，效果并不特别理想。通过对 MAG 焊过程进行工艺试验，来寻找其焊接参数和熔池形状之间的关系，为 MAG 焊过程的熔透控制奠定良好的基础。

采用和 TIG 焊过程熔透控制试验相同的硬件平台，工件也仍然采用和 TIG 焊试验中相同的两种形状和尺寸的 2mm 厚的 Q235 钢板。

在 MAG 焊接试验中采用的是国产 MAG 焊机；采用 $\text{Ar}80\% + \text{CO}_220\%$ （体积分数）作为保护气体，气体流量范围是 8 ~ 15L/min；焊接速度在 0.3 ~ 0.6m/min 之间可控；电弧电压范围是 18 ~ 23V；焊接电流范围是 70 ~ 180A；焊丝选择 $\phi 1.0\text{mm}$ 的细焊丝；焊丝干伸长（为便于测量，实际是导电嘴-焊件间距）是 6 ~ 15mm。上述焊接参数的选择，可以保证 MAG 焊接过程在短路过渡范围内。

由于试验中的 MAG 焊过程为短路过渡形式，在焊接过程中有着周期性的熄弧和燃弧过程，而

熔池形状也会因此而周期性变化。MAG 焊过程中典型熔池形状变化周期见表 5-3-4。

由表 5-3-4 的熔池形状及宽度分析可知，MAG 焊过程的熔池形状并不稳定，即使没有外界干扰因素的影响，由于短路过渡本身引起的燃弧和熄弧过程，同样会导致熔池形状的剧烈变化。如表 5-3-4 的周期一中，编号为 028 的熔池图像是周期一中的熔宽最大值，对应着电弧引燃初期的情况，随后从编号为 029 到编号为 043 的熔池图像的熔宽逐渐变小，对应着短路过渡时的情况，最后编号为 043 的熔池图像的熔宽再次突然变大，标志着另一个短路过渡周期的开始。这是随机采集到燃弧和短路期间的熔池图像，其周期变化与实际的短路过渡周期并不是一一对应的。同样，在表 5-3-4 中的周期二、周期三中，也有类似周期一中的熔池变化过程。

表 5-3-4 不同周期下 MAG 熔池形状及宽度表

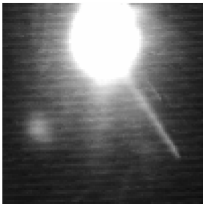
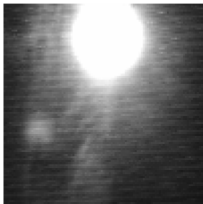
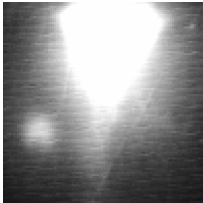
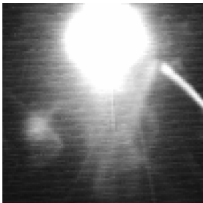
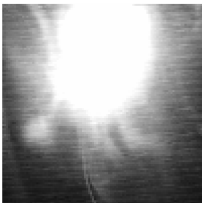
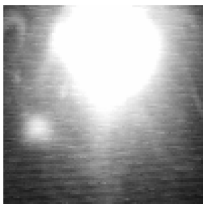
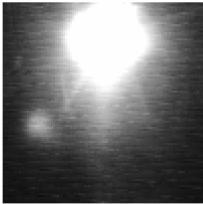
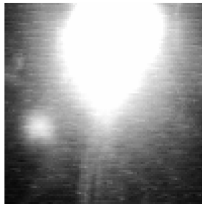
周期一				
熔池图像编号	028	036	043	044
熔池图像				
熔池宽度(像素)	46	37	41	48
周期二				
熔池图像编号	388	393	399	400
熔池图像				
熔池宽度(像素)	51	44	43	49
周期三				
熔池图像编号	588	593	603	604
熔池图像				
熔池宽度(像素)	55	45	44	51

图 5-3-41 所示为未加控制的整个 MAG 焊过程中的熔池宽度变化曲线，可见，由于短路过渡中燃弧、熄弧过程的反复进行，熔池形状的变化非常大，宽度的波动幅度相应也很大。另外还发现，在整个变化曲线中，中部的熔宽比两端略大些，这是因为采用的工件形状特殊：两端宽、中间窄，所以焊接过程进行到工件中部时，熔池形状还是比两端要略宽些。

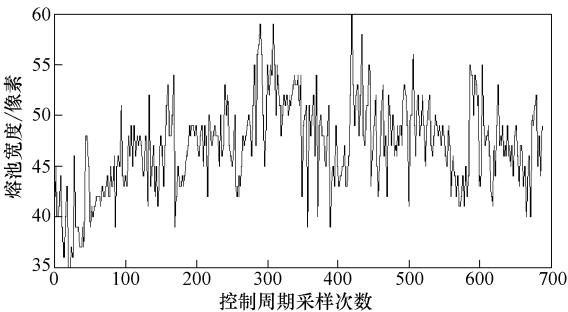


图 5-3-41 MAG 焊过程未加控制下的熔池宽度变化曲线

图 5-3-42 所示为实际 MAG 焊试验过程中得到的突变形工件和渐变形工件的焊缝正反面形状照片。试验中设置的焊接参数如下：

焊接电压：18V；焊接电流：80A；焊接气流量：10L/min；焊丝干伸长：11mm；焊接速度：0.3m/min；焊接距离：250mm。

从图 5-3-42 可见，工件的形状并没有对 MAG 焊的正面焊缝造成明显的影响，在选择好适当的焊接参数后，焊接过程比较稳定，基本无飞溅，正面焊缝的形状也比较美观。工件形状对反面焊缝形状有一定的影响，在工件形状变窄区域，熔池宽度出现明显的变宽。

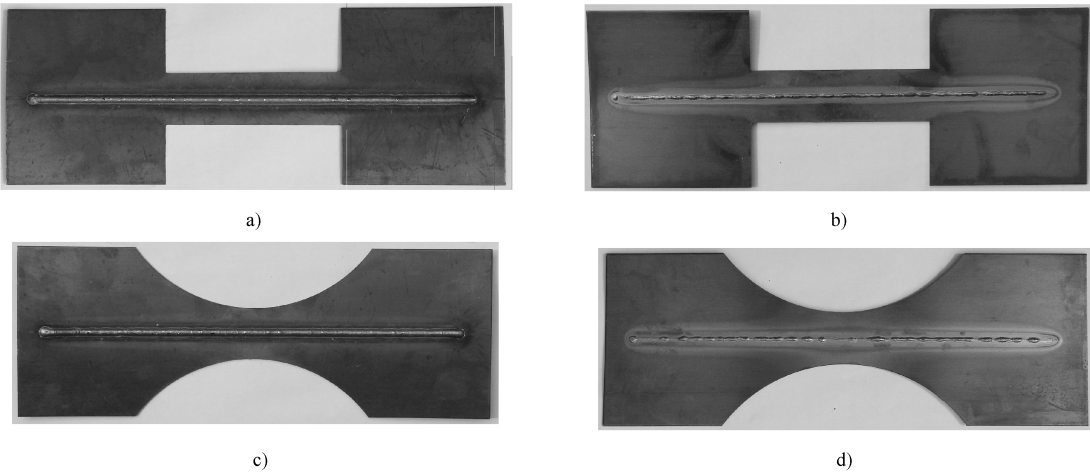


图 5-3-42 两种形状工件在 MAG 焊过程中无控制下的焊缝形状照片
a) 突变形工件正面焊缝 b) 突变形工件反面焊缝
c) 渐变形工件正面焊缝 d) 渐变形工件反面焊缝

综合图 5-3-41 和图 5-3-42 可见，由于 MAG 焊过程的短路过渡形式，使得 MAG 焊的焊接电流和焊接电压一直在变化，而不可能像 TIG 焊过程的焊接电流和焊接电压那么稳定，这样就使得 MAG 焊过程的熔池正面图像本身就是剧烈变化的。如果在 MAG 焊熔透控制中仍然采用和 TIG 熔透控制一样的方法：仅仅从熔池正面采集图像，控制焊接电流，这是比较困难的。首先 MAG 焊过程

的熔池正面图像是剧烈变化的；其次 MAG 焊过程的焊缝成形不仅取决于焊接电流，而是要求焊接电流、焊接电压、气流量、焊丝干伸长和焊接速度等诸多参数相配合，才能取得较好的焊接效果。但是从图可见，MAG 焊过程的熔池反面图像与工件形状有一定的关系，而且反面熔池形状不受弧光、飞溅等噪声的干扰，另外，焊缝余高也和工件形状有关，综合考虑这些信息，应该可以为 MAG 焊过程的熔透控制提供积极的参考。对于熔化极气体保护焊的熔透控制，用区分不同工艺采取相应的控制策略。如脉冲 MIG 焊可以采取在基值电流时进行熔池图像采集，以保证熔池图像的一致性。而对于短路过渡的 MAG 焊或者 CO_2 焊工艺，则可考虑在一元化参数调节焊机的基础上，并且保证在焊接过程控制比较稳定的情况下，在短路过渡期间采集熔池图像，以保证图像受弧光干扰较小。总之，对于熔化极焊接的熔透控制尚需进行很多探索性的研究。

3.4 焊缝识别及自动跟踪

焊缝跟踪虽然已经研究了许多年，取得了大量的研究成果，但是由于实际焊接生产过程的复杂性，在焊接生产中的应用仍然有很多问题尚待解决。目前，MAG 焊过程的焊缝跟踪及控制还没有一个成熟的方案。要设计一个低成本的焊缝跟踪控制器，首先必须要分析整个系统的工作过程，即首先要明确系统的属性、控制对象、输入输出量和偏差控制量等的处理，其次要选择何种的控制算法才能实现比较高的跟踪精度。

3.4.1 焊缝位置检测

在焊缝跟踪中采集到的焊缝图像有畸变，并且在试验时不可能做到焊枪的起始位置每次都一样，所以采用了屏幕实时校准的办法来标定每个像素对应的实际距离，如图 5-3-43 所示。图中焊丝对准中线就表示标定有效。一般的标定值要求在每像素对应 $0.1 \sim 0.12\text{mm}$ 之间，都可以满足精度要求。

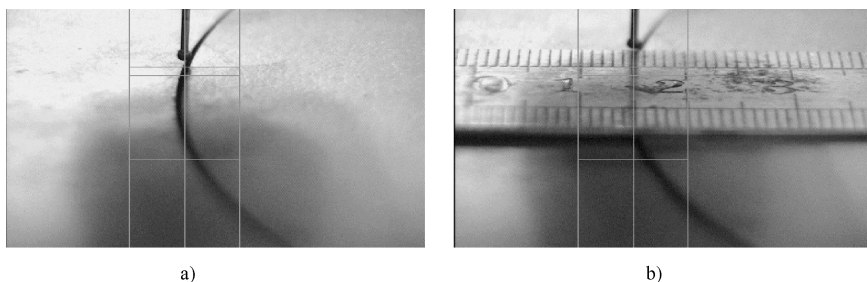


图 5-3-43 焊缝起始点对中与标定图

a) 焊缝起始点对中 b) 标定图

在一个自动控制系统中，参与控制调节的信号可能来自 3 个方面，即参考输入量、被控制量以及干扰量。所谓干扰量是指除参考输入量和反馈信号外的对系统被控制量产生影响的其他因素。当被控制量参与系统控制时，就不需要引入干扰的补偿机制。按照被控制量（输出）是否参与控制可把控制方式分为开环系统和闭环系统两种。开环系统没有反馈环节，闭环系统则通过反馈环节来影响系统的输出量。在实际的焊接生产中，目前采用的方法，如机器人示教等都是事先规定好焊枪的运动轨迹，因此这种带有预先规划性质的跟踪系统是开环控制系统。而采用视觉传感器 CCD 采集的图像进行分析，得到的是沿焊枪行走方向熔池前端的一段焊缝曲线的位置变动。焊缝跟踪系统的被控制量是在垂直于焊接方向上的焊枪位置相对于焊缝中心的偏差值，而焊缝中心的位置变动既不是参考输入也不是反馈信号，是一种干扰。在焊缝曲线尚未影响到控制量之前，系统实际上已经

检测到了这种变动的干扰, 这样当焊枪行走到预定的位置处时就可以采用偏差已知的调节方法, 实现焊缝跟踪的定位调节, 即这是一个闭环系统。

在焊缝跟踪系统中, CCD 检测到的焊缝位置其实并不是真正的被控制量。而且由于 CCD 的位置和试件之间有一个夹角, 不是在中轴线上, 所以采集到的图像有畸变的现象。在本系统中是选择垂直于焊接方向上焊丝相对于焊缝曲线的位置偏差为被控制量的, 这就要求控制过程能够根据采样偏差的大小实时调节系统的运动。而实际上由于 MAG 焊熔化极的特点, 使得焊丝在整个焊接过程中被熔池和试板反射的弧光所掩盖, 无法用 CCD 传感器检测出来。CCD 传感器检测出来的实际上是熔池前端的小段被弧光照亮的焊缝。在实时采集的焊接过程图像上如何用小波滤波后检测出图像上的焊缝位置。在得到比较准确的焊缝位置后, 后续的控制就需要根据这个信息来调节焊枪的位置。

在焊接过程中, 由于夹具不紧、工件放置位置不平等多种原因, 工件会在平台上产生滑动, 而且这种滑动基本是向一个方向。滑动速度与焊接速度有关, 焊接速度一定时, 滑动速度也基本不变。根据这一特点, 系统设计了一套开闭环结合的轨迹控制模式, 在自动跟踪时具有更好的稳定性和抗干扰能力。其基本原理是利用焊接时的斜率控制进行跟踪。如前分析, 放在平台上的工件总是大体上按照一定的速率向一个方向滑动, 利用 CCD 传感器可以将其移动的速度检测出来, 然后按照此方向和速率跟踪, 那么基本上可以消除跟踪时的低阶误差, 由外界干扰及焊缝本身不平整等因素引起的高阶误差可以通过统计学的办法尽量消除。轨迹跟踪工作原理如图 5-3-44 所示, 开始焊接前焊枪和焊缝中心对准, 随后三维行走机构开始移动, 经计算机扫描周期 T 后, 在 t_0 时刻, 焊枪偏离焊缝中心为 d_0 。计算机计算出偏差后, 发出跟踪命令, 使焊枪重新与焊缝中心对准, 经过几次调节, 计算机在 t_1 时刻计算出工件移动速度为 v_1 。这样, 计算机将按这个速度指挥执行机构进行跟踪。工件移动速度 v 测量的是否准确在整个跟踪过程中起着重要的作用, 所以必须选择一段工件表面状况良好的位置开始焊接, 将干扰因素减小到最小。但是, 由于现场情况非常复杂, 不可能将所有干扰因素都排除, 计算出的 v 值也难以绝对准确, 可能比实际值稍大也可能稍小, 所以除了开环的轨迹跟踪外, 必须加上闭环的纠正误差算法。计算机通过统计每次误差的大小及方向, 周期性地补充调整。下面以计算的 v 值稍小为例进行说明: 在时间 $t_1 - t_2$ 段, 系统按照测得的工件移动速度 v 进行跟踪, 由于 v 值稍小, 系统始终处于滞后状态。计算机通过统计每次的偏差发现系统滞后以后, 在 t_2 时刻会以较大的幅度 (对应图中线段 $d_2 - d_1$) 调整焊枪位置, 使系统处于略微超前的状态, 然后继续按照 v 跟踪。在时间 $t_2 - t_3$ 段, 计算机统计每次偏差发现系统略微超前, 在 t_3 时刻又会以较大幅度将焊枪位置由 d_4 调整到 d_3 , 使得系统又处于略微滞后的状态。 t_4 时刻再调整使系统超前。如此循环就可保证焊枪和焊缝中心的偏差始终在系统允许的误差范围 e 内。这种通过初始阶段计算出的偏差斜率进行总体跟踪, 周期性统计纠偏的办法可以使系统比较稳定地工作, 增强系统的抗干扰性, 提高系统的适应性。试验证明, 只要在初始阶段选择一段工件表面状况良好的位置开始焊接, 从而保证系统在初始阶段较准确地测出偏差斜率, 就可以保证系统的准确跟踪。此外, 在跟踪过程中, 如果遇到工件表面状况太差而无法获得可以进行处理的信号, 系统将按照所测得的斜率进行跟踪, 待越过干扰后再进行正常的跟踪。

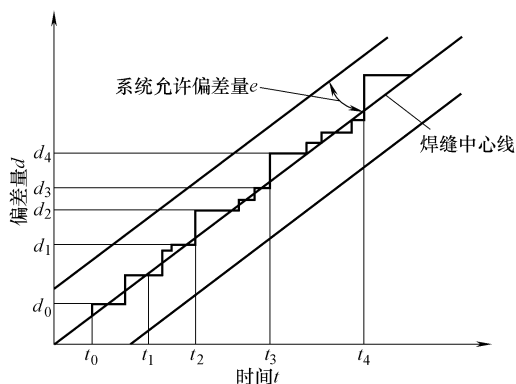


图 5-3-44 轨迹跟踪工作原理图

因为在调节过程中,行走机构的调节响应速度是至关重要的,为了加快调节速度,也为了加强系统的稳定性,选择了在自动控制中最广泛使用的传统的 PID 控制器。

PID 控制器即比例、积分和微分三模式算法,是根据理想设定值 S 与实际采集值 Y 相减,得到偏差 e ,再按照偏差量 e 进行比例 (P)、积分 (I) 和微分 (D) 的组合运算,输出控制量 U ,对系统进行控制。

PID 控制器的基本原理如下:

$$u = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) + u_0 \quad (5-3-31)$$

式中 $\frac{1}{T_i} = K_p K_I$, $\frac{de}{dt} = K_D$ ——分别是比例 (P)、积分 (I) 和微分 (D) 的运算常数。

u_0 ——控制常量,即误差为零时的控制量。

式 (5-3-31) 中第一项为比例输出项,是构成输出的主要成分。比例控制器对误差 e 是即时响应的,误差一旦发生,调节器立即产生控制量,是被控过程量 u 向减小误差的方向变化。比例调节虽然可以使误差减小,但还不能完全消除误差,这样就有残留的误差。加大比例系数 K_p 可以减小残留误差,但会影响系统的稳定性,所以也不能取得太大。

第二项为积分项,能消除比例项调节后残留的误差。积分项的输出值大小取决于对误差的积累,虽然误差不变,但是积分项的输出还在增大,直到使误差为零。因此积分项的加入相当于能自动调节控制常量 u_0 ,使系统趋于稳定。积分项的加入虽然可以消除残留误差,但是降低了系统的响应速度,需要在控制器中加入微分项来克服这个缺点。

第三项为微分项。微分的作用能缓慢地持续多个采样周期,能改善系统的响应时间,并由于实际微分 PID 算式中包含有一阶惯性环节,具有数字滤波功能,有利于减小超调,克服振荡,加强系统的稳定性,缩短系统的调节时间。

对于本焊缝跟踪系统数字 PID 控制器的设计,首先要确定它的采样周期,在本系统中,采样周期是由 CCD 采集图像的速度和行走机构的调节能力来决定的,经过比较试验,把采样周期定在 200ms。设每一个周期需要补偿的偏差量为 $e(t)$,控制系统的输出为 $u(t)$,则其离散化的控制规律为

$$u_i = k_p \left[e_i + \frac{T}{T_i} \sum_{j=i}^i e_j + \frac{k_p T_d}{T} (e_i - e_{i-1}) \right] \quad (5-3-32)$$

采用增量算法得到的输出为

$$\Delta m_i = m_i - m_{i-1} = k_p \left[(e_i - e_{i-1}) + \frac{T}{T_i} e_i + \frac{T_d}{T} (e_i - 2e_{i-1} + e_{i-2}) \right] \quad (5-3-33)$$

PID 控制器可以提高系统的鲁棒性和快速响应的性能,但是系统的参数整定必须适当才会得到比较好的控制效果。固定参数 PID 控制算法的程序设计相对比较简单,并且应用领域非常广泛,非常成熟,已经有许多现成的程序稍加更改就可以利用,在此不再详细讨论。

为了安全运行,需要对被控量的上下限进行限制,当被控量超出一定范围时就停止系统的运行。本系统中,由于焊缝很窄,在当前被控量偏离上一次被控量焊缝位置 5mm 时,就可以停止焊接,以免误焊到夹具上。

为了实现平稳控制,还需要对参与控制的被控量的变化率加以限制。变化率的选择要适中,太小会使响应速度变慢,太大则达不到限制的目的。

在自动状态下进行 PID 计算,即按照 PID 控制的差分方程计算控制量 U ,并设限。在输出控制量 U_0 前,还要经过图 5-3-45 所示的各项处理和判断,以便实现安全平稳的操作。

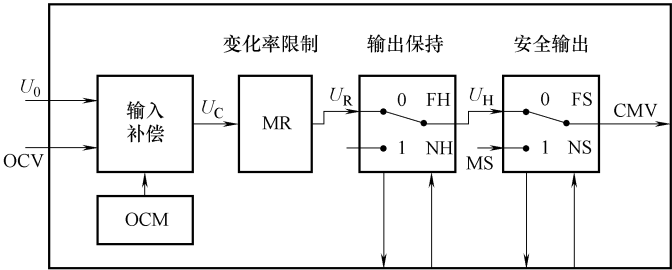


图 5-3-45 控制量处理过程的框图

3.4.2 焊缝自动跟踪

MAG 焊兼有 CO₂ 焊热效率高、电弧挺度好和熔深大的优点，同时又具有 MIG 焊飞溅少、焊接过程较稳定的综合优势。在 MAG 焊过程中，CCD 所捕获的熔池图像必然会有飞溅颗粒形成的点噪声和线状噪声，烟尘和弧光则使图像边界变得模糊不清，是一个典型的非线性图像，它为后续图像处理带来了很大困难。并且 MAG 焊熔池图像背景噪声复杂，所需预处理时间也相应变长。MAG 焊熔池图像处理的关键是滤波和边缘检测，用传统的图像处理算法，如微分算子、曲面拟合法等处理，效果都不理想。目前在国际焊接领域，基于视觉图像处理的熔化极气体保护焊过程控制还没有找到快速而有效的算法，这是众多研究者在焊接熔透控制中主要围绕非熔化极、无飞溅、焊接过程稳定、可控性好的 TIG 焊进行的主要原因。

用这种办法采集到的图像质量是比较好的，但是在对 MAG 焊进行图像采集时这种方法就行不通了。从图像波形中可以发现，MAG 焊过程中焊接电流瞬时波形的周期是随机的，不像 TIG 焊那样固定不变，并且可调节。这样就带来一个问题，即在控制上不好判断焊接电流由峰值向基值转换的时刻，这也是熔化极气体保护焊的一个特点。所以在试验时是按照固定时序来采集图像的，这就不可避免地会遇到在采集图像过程中弧光时大时小不稳定的问题。这个问题目前只有依靠后期的算法提升来解决。如图 5-3-46 所示，对比 MAG 焊与 TIG 焊的原始图像，可以看出两者之间的差别很大，采集到的 TIG 焊图像质量相对 MAG 焊的图像质量从图像处理的角度来说要好得多。

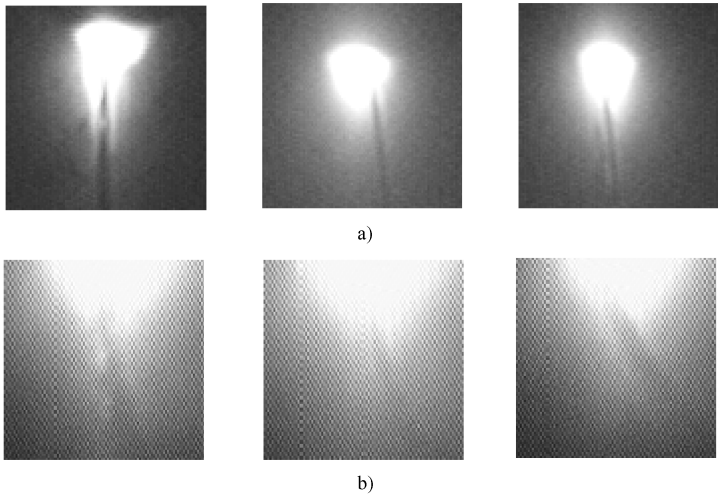


图 5-3-46 TIG 焊与 MAG 焊原始图像对比
a) TIG 焊原始图像 b) MAG 焊原始图像

为了更加符合工业应用的实际，选择了薄板窄焊缝的工件。可以看出工件的曲线曲率是比较大的，由于 CCD 安置时的位置关系，使得在 CCD 的视野中，最大曲率在拐弯处达到最大，已经超过了 60° ，如图 5-3-47 所示。这就给控制带来了很大难度，要求跟踪控制算法有很大的调节力度。

在以往焊接图像处理的研究中都是假定焊缝在图像上的特征为细长的“暗沟”状，其实通过对试验过程的回显发现，焊缝在图像上的特征只是在某些时候成细长的“暗沟”状，有些时候，尤其是在焊缝曲线的曲率比较大的时候，通过 CCD 拍摄到的焊缝是发亮的，如图 5-3-48 所示。这主要是因为底板以及焊缝接头处的工件表面漫反射焊接时的强烈弧光所致。在判断焊缝边缘时必须考虑这种情况。对采集到的 MAG 焊过程进行图像处理寻找焊缝中心位置的方法如下：通过 CCD 采集的图像，在经过处理后，检测出所有灰度值突变的点，以确定焊缝棱边的对应点所在区域（即图中的 A-B 点和 D-E 点），确定了两个棱边的对应点所在区域后，与棱边对应的点（即图中的 B 点和 D 点）就在 AP 和 EQ 之间并且是对应灰度值突变点中斜率突变的点。在 AP 和 EQ 两线段上按照一定间隔设置若干个点，首先可以算出每两点之间线段的斜率，然后可以求出每相邻两线段的斜率的差值。通过试验设定合适的差值阈值，即可找到斜率突变的点对应为棱边。以计算左侧棱边为例，从 P 点开始向左侧逐段计算斜率并比较每两线段间斜率的差值是否达到所设定的阈值，如没有达到则继续向左侧进行搜索直到找到斜率的差值突变的线段为止，此处的点即是焊缝的棱边（即 B 点）。取二棱边中点即是坡口的中心。实践证明，这种算法可以比较准确地计算出焊缝中心位置。

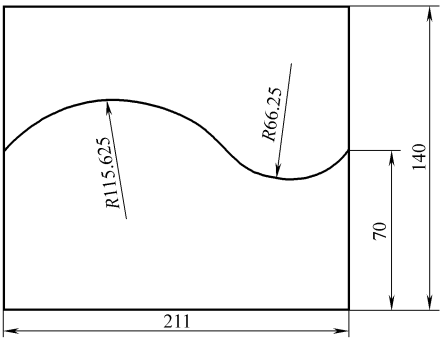


图 5-3-47 焊缝形状尺寸图

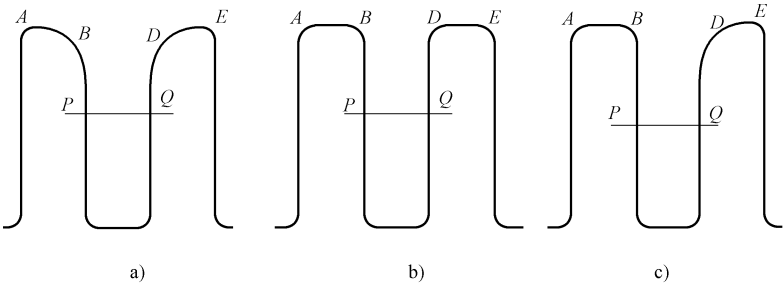


图 5-3-48 焊缝中心识别原理图

a) 两侧边缘为缓变 b) 两侧边缘为陡变 c) 边缘中缓变与陡变并存

如图 5-3-49 所示，分别对采集到的一个 MAG 焊过程中起弧阶段、焊接阶段以及拐弯时的图像进行了以 Bubble 小波为基的 M 带小波变换处理，并用零交叉边缘检测方法检测出的边缘结果，图中焊缝边缘都是经过细化处理后的单像素边缘。

下边分别分析曲线和折线形状的焊缝在自动跟踪中检测到的偏差曲线和实际跟踪焊接的效果照片。

曲线焊缝焊接的难度是比较大的，在观察焊缝的曲线形状时，按照真实曲线曲率计算值时，并没有超过 45° ，但这是在垂直于工件的平面内观察的结果。实际上为了避免焊枪的影响，在安装 CCD 摄像头时是以近乎平行的角度放置的，这就不可避免地使得采集到的图像存在畸变。如图

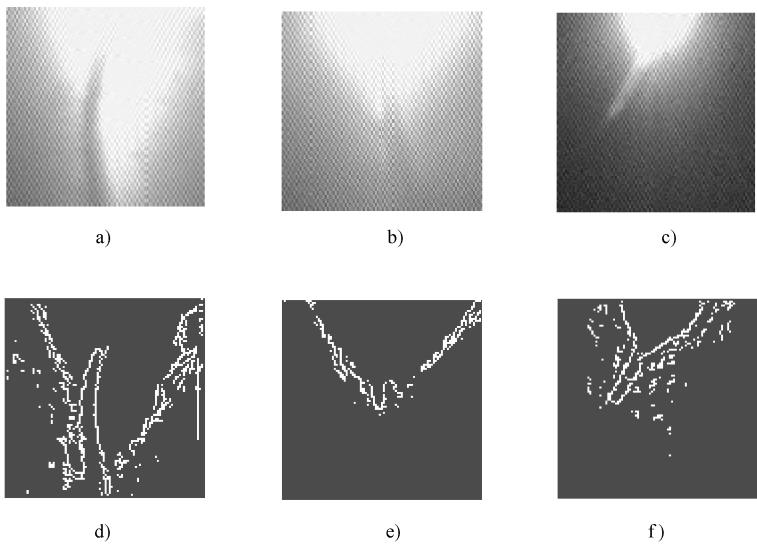


图 5-3-49 MAG 焊过程图像处理结果

a) 起弧阶段 b) 焊接中间 c) 转折阶段 d) 起弧焊缝 e) 中间焊缝 f) 转折焊缝

5-3-50所示，焊缝其曲率在 CCD 的视野里已经超过 60° ，这种情况增大了控制的难度，尤其是在焊接末段，由于前段工件的热变形，使得焊缝向中心挤压，会使薄板焊接本来就很窄的焊缝发生重叠的现象，非常不利于图像处理。针对这种情况，采取了一些相应的工艺措施，如在施焊前先对工件两头的焊缝进行定位焊等，避免出现找不到焊缝的情况。

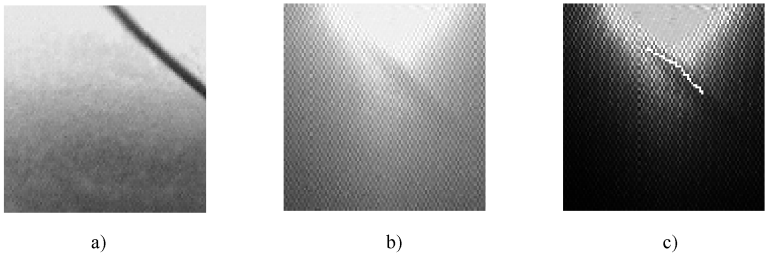


图 5-3-50 CCD 采集的图像上的曲率在焊接过程中的比较

a) 起弧阶段 b) 焊接过程中 c) 焊接结束

图 5-3-51 所示为跟踪时的偏差量检测曲线。由于偏差量的计算是根据行走机构步进电动机的转数来定的，所以 Y 轴表示的是电动机的转数，每转对应 0.01mm。从图 5-3-51 还可看出，在焊接过程中有几个地方的偏差明显较大。如在焊接后半段跟踪曲线焊缝的偏差明显比前半段大，尤其是在快结束的时候，振荡比较厉害。出现这种情况的主要原因是由于焊接过程中的热变形引起的焊缝宽度变化，虽然已经使焊缝两头刚性固定，但由于焊缝较长，在末段的变形还是比较厉害，这

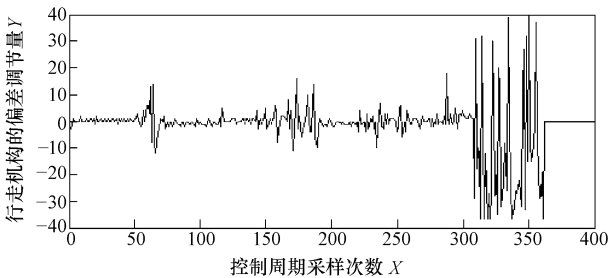


图 5-3-51 偏差量检测曲线

样会使焊缝边缘的判断出现偏差,从而引发系统加大调节量。还有在曲线中部两个圆弧的对接处,偏差量也比较明显,这主要是由于曲率在此处最大,使得机构的调节力度也加大而造成的。实际跟踪结果如图 5-3-52 所示。

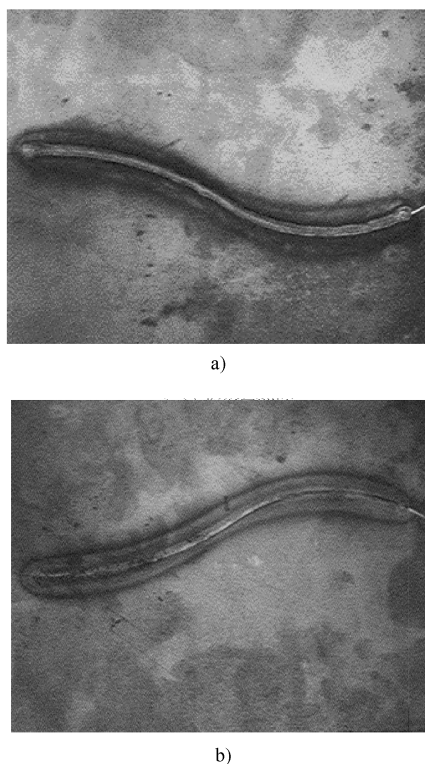


图 5-3-52 实际跟踪结果

a) 焊缝正面 b) 焊缝背面

参 考 文 献

- [1] 胡绳荪. 焊接自动化技术及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] 殷树言. CO₂ 焊接设备原理与调试 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] 杨春利, 林三宝. 电弧焊基础 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
- [4] 陈善本. 焊接过程现代控制技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.
- [5] 吴林, 陈善本. 智能化焊接技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [6] 赵熹华. 焊接方法与机电一体化 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [7] 黄石生. 弧焊电源及其数字化控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [8] 魏继昆, 谭蓉. 先进焊接设备与维修 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [9] 王晶, 尹显华. 我国焊割设备市场统计分析预测 [J]. 电焊机, 2010, 40 (1): 8-11.

第4章 焊接自动化专用设备

本章阐述焊接自动化专用设备的基本知识，包括基本概念、特点、分类、发展趋势、系统构成与工作原理、机械和电气设计的关键技术、典型的焊接自动化专用设备介绍等。

4.1 概述

4.1.1 焊接自动化专用设备的概念与特点

焊接自动化专用设备又称焊接专机，属于刚性或半刚性自动化设备。它是为特定产品的自动化焊接而专门设计的机电一体化系统。它通过先进焊接工艺和自动化焊接设备（焊接胎夹具、定位装卡、运动控制）的有机结合，将人从繁重的、重复的、有害的工作中解放出来，实现高效率、高品质、低成本的批量化规模生产。

与手工焊和机器人焊接相比，焊接专机具有以下特点：

1) 可以实现高效率 and 高质量焊接。高效率体现在焊接生产过程的机械化和自动化、高效焊接工艺的使用等，可以以人力难以胜任的快速生产节拍长时间、连续完成焊接作业。高质量体现在消除了手工焊的抖动、疲劳等人为因素，实现精确控制，焊缝质量的一致性得到保证。

2) 适合焊接形状比较简单的焊缝，如长直缝、环缝等，并且焊缝越长，效率越高。

3) 适合于大批量生产。批量越大，优势越明显。

4) 操作简单，对工人的要求低。

5) 一次投资少，成本回收周期短。

6) 污染小，焊接作业现场环境得到改善，工人劳动强度降低。

7) 与焊接机器人系统相比，焊接专机柔性差，焊接产品单一，改型困难。

8) 与手工焊相比，焊接专机的适应性差，对工件坡口准备和焊缝位置精度要求严格。

4.1.2 焊接自动化专用设备的种类

由于焊接产品的多样性，焊接自动化专用设备也多种多样，大到船厂大型板材拼焊设备、大型容器环纵缝焊接操作机和滚轮架，小到细管的自动管焊机等。目前，焊接自动化专用设备还没有统一的分类标准，为了对焊接专机有个整体了解，这里列举出几种分类方法：

(1) 按焊缝形状分 有板材拼焊专机、筒体环缝焊接专机、筒体纵缝焊接专机、管板焊接专机、马鞍形焊缝焊接专机（见图 5-4-1a）等。

(2) 按焊缝轨迹生成方式分 焊枪不动，工件运动（如机床式直缝焊接专机、滚轮架、旋转变位机等）；工件不动，焊枪运动（如龙门架式拼板焊接专机、全位置管焊机、焊接操作机等）；焊枪与工件协调运动，如复杂形状焊缝的焊接专机。

(3) 按使用的焊接方法分 如单丝、多丝埋弧焊专机，冷丝、热丝 TIG 焊专机，MIG/MAG/CO₂ 焊专机，P+T 复合焊专机，双丝焊专机，激光焊专机，高频焊专机等。

(4) 按焊缝位置分 如平焊专机、立焊专机、横焊专机、全位置焊专机。

(5) 按焊枪个数分 如多焊枪多工位专机，单工位多焊枪专机（双面双弧焊、窄间隙多丝焊，双机头全位置全自动 GMAW 焊接设备等）。

(6) 按通用程度分 有标准型（各系列操作机、滚轮架、变位机等）和非标准型。

(7) 按大小分 可分为以下几种：

1) 大型：如大型造船厂应用的门架式钢板纵缝拼焊机、 $12.5\text{m} \times 10\text{m}$ 的超大型立柱横梁式焊接操作机，图 5-4-1b 是德国 DEUMA 生产的大型焊接操作机与变位机配合对直径达 11.58m 、重量达 250t 的涡轮机外壳进行焊接。

2) 中型：如波纹管精密 TIG 自动焊接系统、双工位龙门式自动焊接设备、型钢生产线。

3) 小型：如小管内壁自动堆焊机、传动轴双环缝焊接专机和小型管焊机等。

(8) 按自动化、智能化程度分 如开环控制的初级焊接专机；带有弧长控制、焊缝跟踪、焊接参数预置等功能的自适应焊接专机；集成各种传感器、数据库和专家系统而具有实时检测、判断、识别、自动编程、参数优化、自动焊道编排、焊接质量记录管理等功能的智能化焊接专机。

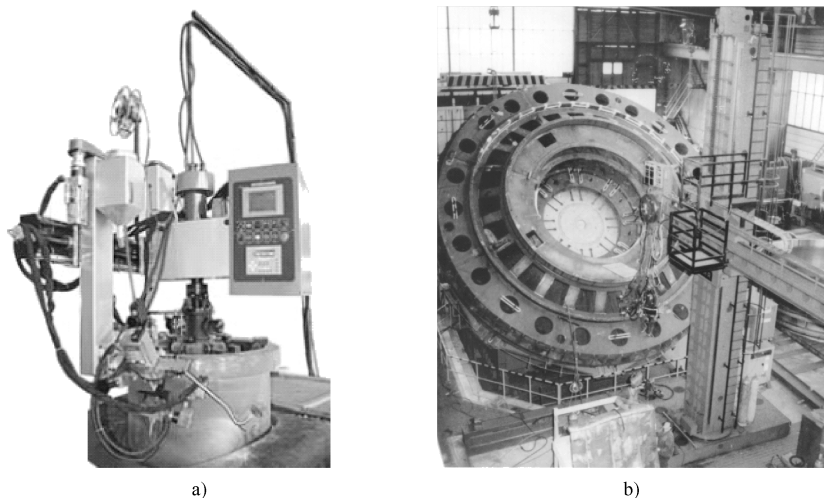


图 5-4-1 焊接专机

a) 马鞍形焊缝焊接专机 b) 大型焊接专机

4.1.3 焊接自动化专用设备的发展趋势

(1) 向大型化和精密化发展 目前已开发的大型焊接设备有以下几种：

1) 重型焊接滚轮架最大承载重量达 1600t ，自动防窜滚轮架的最大承载重量为 800t ，采用 PLC 和高精度位移传感器控制，防窜精度为 0.5mm 。

2) 变位机的最大承载重量为 400t ，转矩可达 $450000\text{N} \cdot \text{m}$ ，框架式焊接翻转机和头尾架翻转机的最大载重量为 160t 。

3) 焊接回转平台的最大载重量为 500t ，立柱横梁操作机和门架式操作机的最大工作行程达 24m ，龙门式操作机最大规格达 $8\text{m} \times 8\text{m}$ 。

4) 焊接变位机最高的重复精度为 0.1mm ，焊接操作机行走机构的定位精度为 0.1mm ，移动速度的控制程度为 0.1% 。

(2) 组成结构上向标准化、模块化方向发展 为缩短专用焊接设备的设计周期和制造成本，专用设备制造厂商提供标准化、模块化的部件，用户根据自己的个性化需求，自行搭建专用焊接设备。

(3) 焊接工艺上向高效化发展 各种高效优质的新工艺得到应用和推广，如高效埋弧焊、

T. I. M. E 和双丝等高效熔化极气体保护焊、等离子弧焊、窄间隙焊、激光焊和电子束焊、复合焊接等。这对于焊接工作量大、连续焊接周期长的厚板焊接，效果更为明显。

(4) 控制上向自适应、智能化、数字化和网络化的方向发展 具体表现如下：

1) 焊缝跟踪、弧长控制等传感器的应用将提高焊接专机的自适应能力。实际生产中，焊件坡口加工质量、焊缝位置装配精度、焊接过程中的变形等，导致变间隙、变错边、变形状、变位置等干扰因素的存在。这样，需要焊接专机具有感知工况变化的能力，并做出实时的调整。自适应能力的加强有利于扩大自动焊接应用的范围。

2) 焊道自动编排软件、焊接参数专家系统、过程监测与控制软件等的应用将提高焊接专机的智能水平。以厚板焊接为例，结构光传感器检测坡口形状；焊道自动编排软件确定每层的焊道数、每道焊缝的填充量，焊道的路径；焊接工艺专家系统进行焊接参数规划，确定应使用的焊接参数。这样可实现从打底焊、填充焊到盖面焊的连续自动焊接。

3) 个体设备的全数字化控制和整体系统的网络化连接和管理。随着计算机技术、网络技术、数字芯片技术、传感技术等技术的发展，数字化焊接的时代已经来临。一个完整的企业数字化焊接系统如图 5-4-2 所示。

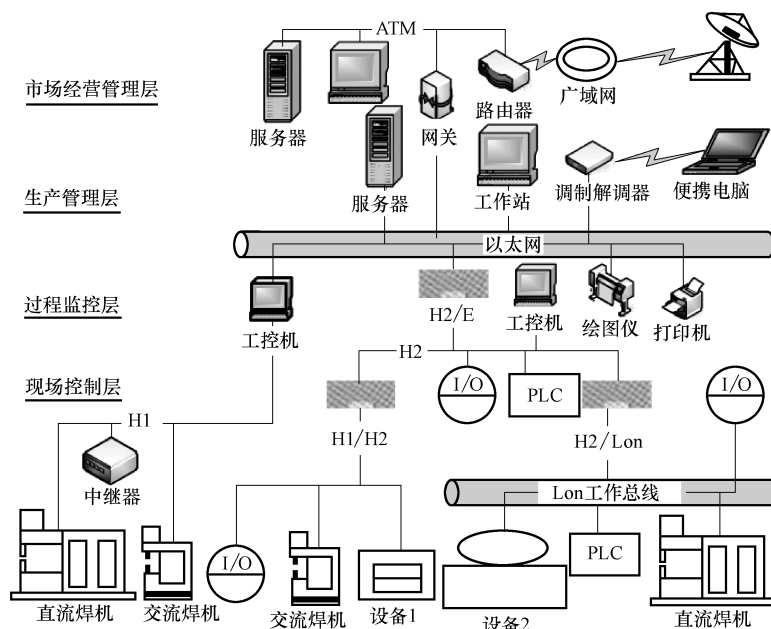


图 5-4-2 数字化焊接系统

这其中包括焊接产品设计数字化、仿真试验数字化、焊接装备数字化、生产过程数字化、管理数字化等多方面，其中焊接装备数字化是实现数字化焊接的基础。焊接装备数字化体现在个体设备的全数字化控制和整体系统的网络化连接和管理。其典型特征为信息流动与共享、现场数据实时采集、焊接过程监控和远程诊断等。

(5) 操作上的发展方向 向着简单化、人性化、友好化方向发展。

4.2 焊接自动化专用设备的系统构成

这里以环缝自动化焊接专机为例阐述焊接自动化专用设备的系统构成。图 5-4-3 是环缝焊接自

动化专机的实物。可看出一个焊接自动化专用设备由以下几部分组成。

1. 机械部分

机械部分的主要作用为：工件的装卡、焊缝的定位；焊缝运动轨迹生成。机械部分包括以下方面：

(1) 工装夹具 如定位装置、夹紧装置、装配胎具等。

(2) 焊接机头 包括焊枪夹持器、用于焊枪位置微调的十字滑块、摆动器、送丝装置、保护气装置等。

(3) 焊接机头的移动机构 如悬臂式操作机、伸缩式操作机、龙门式操作机、全位置爬行导轨等。

(4) 焊件变位机构 如焊轮回转台、焊接滚轮架、头尾架翻转机、焊接变位机等。

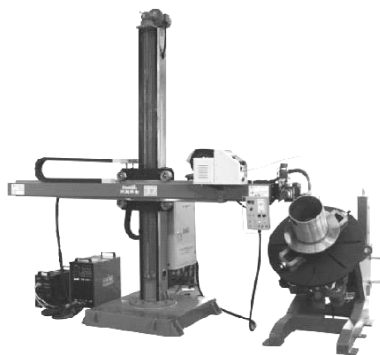


图 5-4-3 典型环缝自动化焊接专机

2. 电气控制硬件部分

电气控制硬件部分由主控计算机、伺服电动机、电动机驱动器、电气接口、人机操作界面等组成。电气控制部分的主要作用包括以下方面：

- 1) 伺服电动机的运动控制。
- 2) 自动焊接过程的完整时序控制。
- 3) 焊接参数的设定、调整和显示。
- 4) 交互功能。
- 5) 异常、故障诊断与处理。
- 6) 焊接过程检测与焊缝质量控制。
- 7) 生产管理。

3. 焊接系统

焊接系统由弧焊电源及外部控制接口、焊枪、送丝机、气体保护、丝盘、丝桶等组成。

4. 焊接质量保证系统

焊接质量保证系统包括焊缝跟踪传感器、弧长控制器、熔池和电弧监控系统等。

5. 控制软件系统

随着焊接专机的要求越来越高、功能越来越多，需要单独开发的控制软件越来越复杂，除了基本的焊接时序控制外，还包括焊接专家系统、多层多道焊缝自动编程、过程记录和生产管理等高级软件系统。

6. 辅助设备

主要的辅助设备有水冷循环系统、送气系统、焊剂输送回收装置、自动剪丝装置、焊丝盘支架等。

4.3 焊接自动化专用设备的焊接系统

焊接专机之所以实现高效率，其最主要因素是集成最高效的焊接方法。因此，针对产品要求选择高效焊接方法是设计焊接专机的基础。

4.3.1 对弧焊电源的要求及其外控方式

1. 对弧焊电源的要求

与手工焊电源相比，自动化焊接用的弧焊电源有其特殊性，体现在以下方面：

- 1) 要求具有 100% 负载持续率。

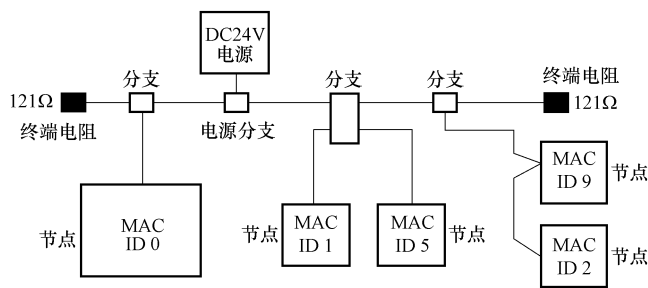


图 5-4-5 DeviceNet 总线系统

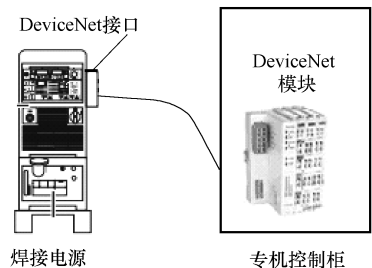


图 5-4-6 DeviceNet 总线连接器及设备连接图

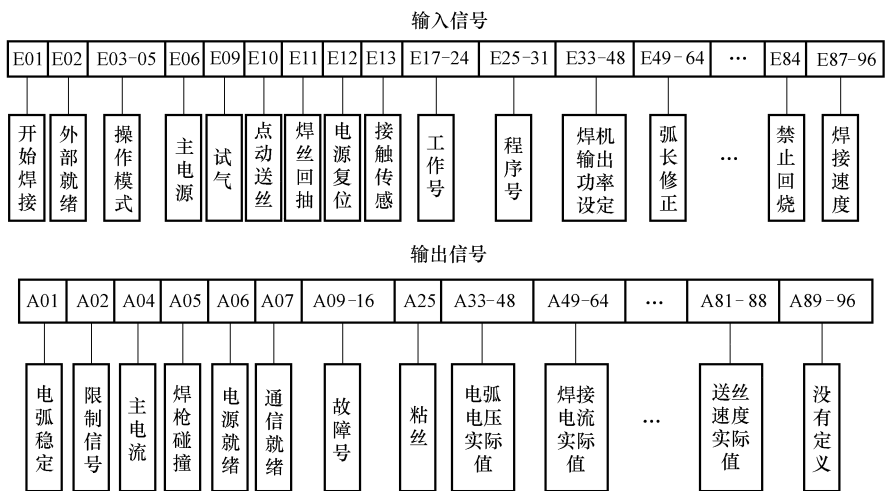


图 5-4-7 现场总线接口提供的外控信号示意图

4.3.2 对送丝机的要求

在焊接专机中，送丝机是极为重要的部件，它是焊接质量一致性的最直接保障。

自动焊接对送丝的总体要求为：送丝平稳，无变形、缠绕和打结现象；送丝速度均匀、可调可控；送丝系统的稳定性好，耐用。

一般地，送丝轮 V 形槽对应硬丝，U 形槽对应铝丝，锯齿状开槽用于药芯焊丝。送丝方式主要有 3 种：推丝式、拉丝式和推拉丝式。推丝式简单，易于操作，主要用于直径为 0.8 ~ 2.0mm 的焊丝。拉丝式主要用于焊丝直径小于 0.8mm 的细丝。拉丝时送丝电动机与焊丝盘均安装在焊枪上。铝丝采用推拉送丝方式，不会有缠绕现象。高扭矩马达适合于送丝速度较慢和较厚的药芯焊丝。

送丝软管的刚性与长度对阻力有影响，软管的刚性大，送丝阻力减小，但操作起来不灵活；软管刚性过小，送丝阻力大，但操作灵活，所以软管刚性应适当。

4.4 焊接自动化专用设备的机械系统

4.4.1 工件定位夹紧装置

在自动焊中，工件定位夹紧是保证焊接质量和提高焊接效率的关键环节之一。定位是指装配时

保证焊件和焊缝在指定位置的过程。正确运用定位原理和恰当选择工艺基准才能保证焊件准确快速定位。根据刚体六点定位原则,只需消除其在空间存在的六个自由度,就实现了焊件的定位。定位依靠胎夹具的定位基准和夹紧机构的作用力。定位器主要有挡块、支承钉、V形铁、定位销等,如图5-4-8所示。

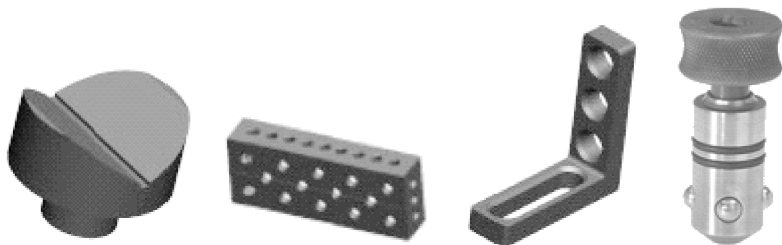


图 5-4-8 常见的定位装置

夹紧和定位是相连的。夹紧一方面保证工件的定位基准与胎夹具的定位表面可靠接触,以实现正确的定位;另一方面,防止装焊过程中焊件发生移动和变形。一个典型的夹紧装置由力源、中间传力机构和压板3部分组成。琴键式压板是经常使用的夹紧装置之一,如图5-4-9所示。夹紧装置根据力源不同可分为机动夹紧及手动夹紧两大类。机动夹紧分为气压传动、液压传动、电动机传动、电磁夹紧及真空夹紧等。图5-4-10所示是常见的夹紧装置。

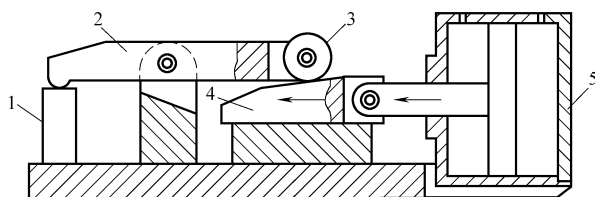


图 5-4-9 琴键式压板

1—零件 2—压板 3—辊子 4—斜楔 5—气缸

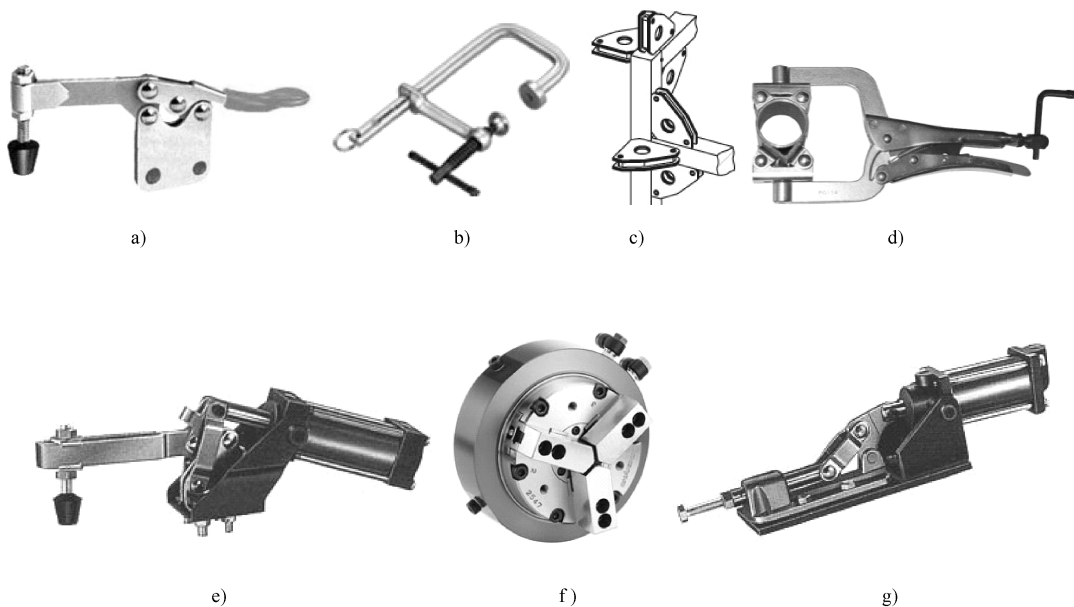


图 5-4-10 常见的夹紧装置

图 5-4-11 是一个筒体内撑夹紧装置，四边的直线段焊缝采用一个大气缸撑起，气缸安装在内撑式夹具的轴心，轴心上按 90°分配安装 4 个楔块，分别带动 4 个直线段焊缝的撑块，当气缸动作时，与楔块连接的 4 个方向的撑块会被顶升，这样可以保证与工件内表面挤紧贴合。传力机构设计四边撑块必须保证同步接触工件，以保证作用力的均匀分布。每个撑块上装有两个弹簧，用于快速复位。工件的四个圆弧角则分别安装独立的 4 个顶升气缸，气缸动作时，顶升 4 个圆弧状撑块与 4 个圆弧角紧密贴合。

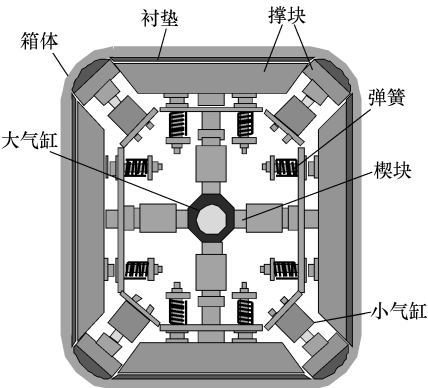


图 5-4-11 筒体内撑夹紧装置

近年来，出现了柔性、组合焊接夹具，如图 5-4-12 所示。可在三维空间像搭积木方式任意装配，可以缩短设计、制造时间，并且可以反复使用，节约研制成本。在批量小、客户要求不同的情况下使用柔性工装制造，是非常实用和经济的方法。

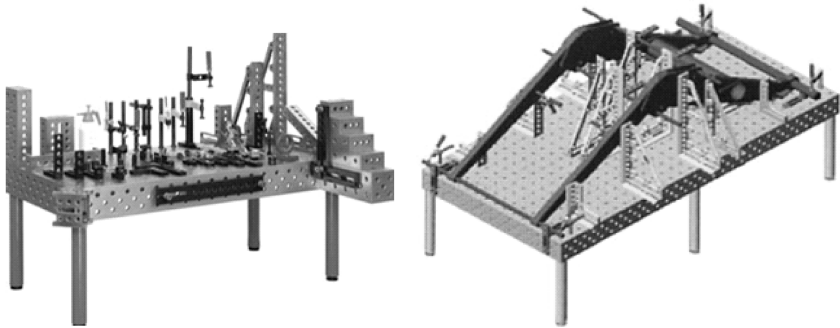


图 5-4-12 组合夹具

4.4.2 焊机头及其移动机构

1. 焊机头

焊机头包括焊枪夹持器、用于焊枪位置微调的十字滑块、摆动器、送丝装置、保护气装置等。典型的焊机头如图 5-4-13 所示。

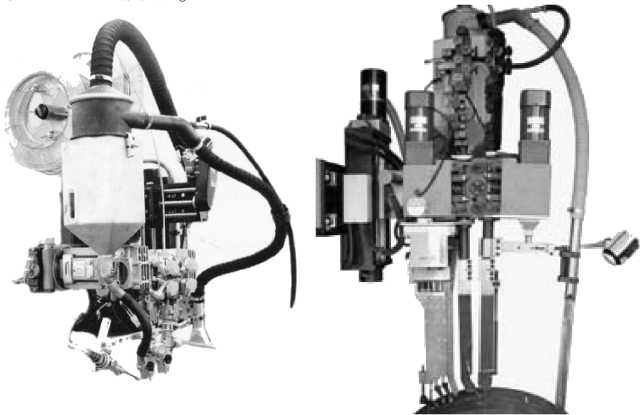


图 5-4-13 典型的焊机头

2. 焊机机头的移动机构

焊机机头的移动机构包括悬臂式操作机、伸缩式操作机、龙门式操作机、全位置爬行导轨等，如图 5-4-14 所示。

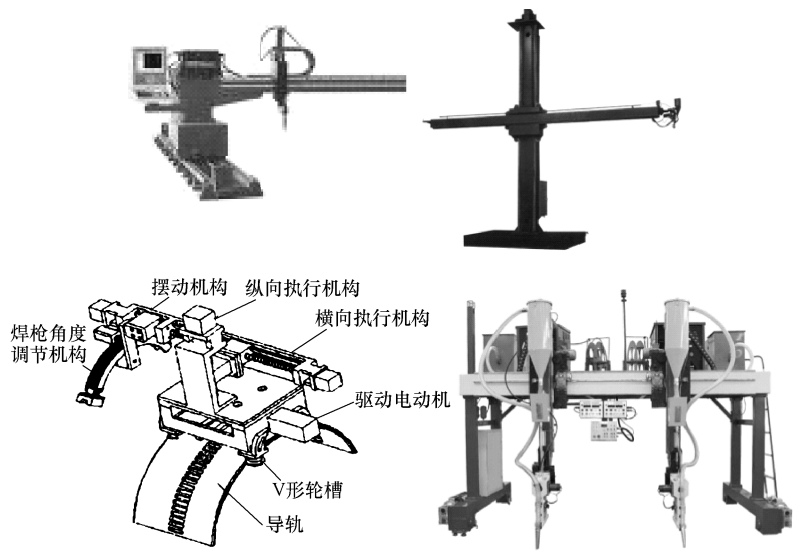


图 5-4-14 焊机机头的移动机构

4.4.3 焊件变位机构及其动力装置

1. 焊件变位机构

焊件变位机构包括焊接回转台、焊接滚轮架、焊接翻转机和焊接变位机等，如图 5-4-15 所示。

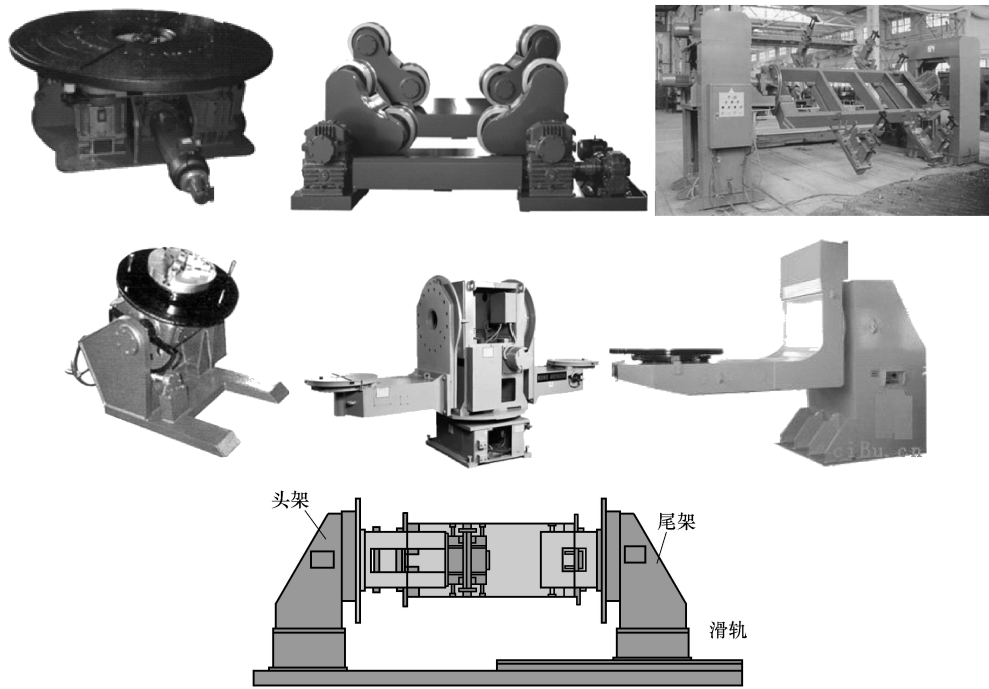


图 5-4-15 常见的焊件变位机构

2. 动力装置

动力装置分为电动、气动、液压驱动3种。在焊接专机中,电动机驱动用得最多。常用的伺服电动机有步进电动机、直流伺服电动机、交流伺服电动机等。

(1) 步进电动机 步进电动机是一种将电脉冲信号转变为角位移的电气装置,如图5-4-16所示。每当电动机绕组接收一个脉冲时,转子就转过一个相应的角度。角位移量与输入的脉冲数严格成正比。只要控制输入脉冲的数量、频率和电动机绕组的相序,即可获得所需转角转速和转动方向。步进电动机起动频率高、响应快,但输出转矩小,只能带动较小负载。用于焊枪位置微调的十字滑块一般用步进电动机驱动。

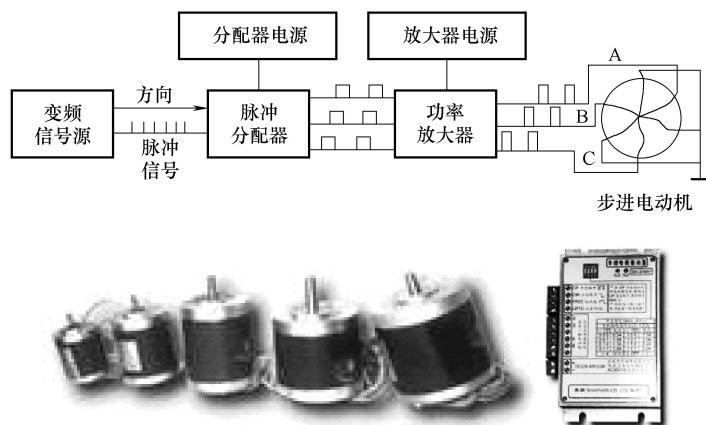


图5-4-16 步进电动机驱动

(2) 直流伺服电动机 直流伺服电动机用直流供电,为调节电动机转速和方向,需要对电枢电压的大小和方向进行控制。目前常用晶闸管直流调速驱动和晶体管脉宽调速驱动两种方式。直流伺服电动机调速方便,具有较好的机械特性。但是,直流伺服电动机具有电刷和整流子,尺寸较大,且必须经常维修,特别是其容量较小,受换向器限制,电枢电压较低;特性参数随速度而变化,限制了直流伺服电动机向高转速、大容量发展。在焊接专机的驱动中,直流电动机的用量逐渐减少,有被步进电动机和交流伺服电动机取代的趋势。

(3) 交流伺服电动机 交流伺服电动机分为永磁同步交流伺服电动机和感应异步交流伺服电动机,如图5-4-17所示。感应异步伺服电动机虽然制造简单、价格低廉,但是在特性上和效率上存在差距,只在大功率场合得到重视。

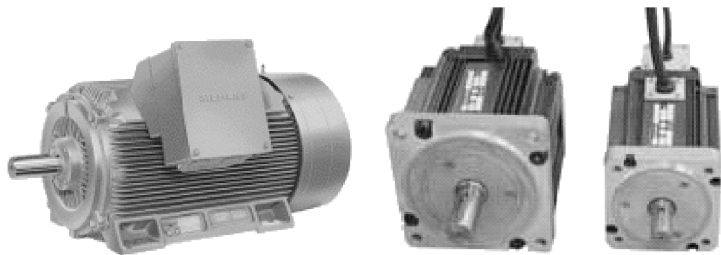


图5-4-17 交流伺服电动机

永磁同步电动机具备十分优良的低速性能、调速范围宽广、动态特性和效率都很高,已经成为

伺服系统的主流之选。交流伺服电动机采用全封闭无刷构造，不需定期检查和维修。结构紧凑、外形小、重量轻。同轴安装有高精度的脉冲编码器作检测元件。

拖动系统的发展趋势是用交流伺服驱动取代传统的液压、直流和步进调速驱动，使系统性能达到一个全新的水平。

4.4.4 传动机构

传动系统是将动力元件的运动和动力传递给执行系统，使之实现预定功能的中间装置，如图 5-4-18 所示。变位机的传动结构如图 5-4-19 所示。常用的传动机构见表 5-4-2。

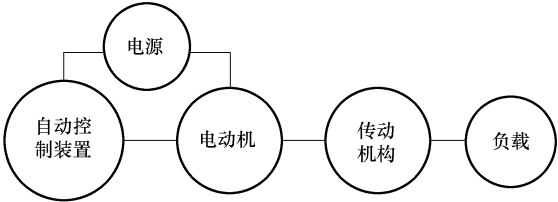


图 5-4-18 传动机构的作用

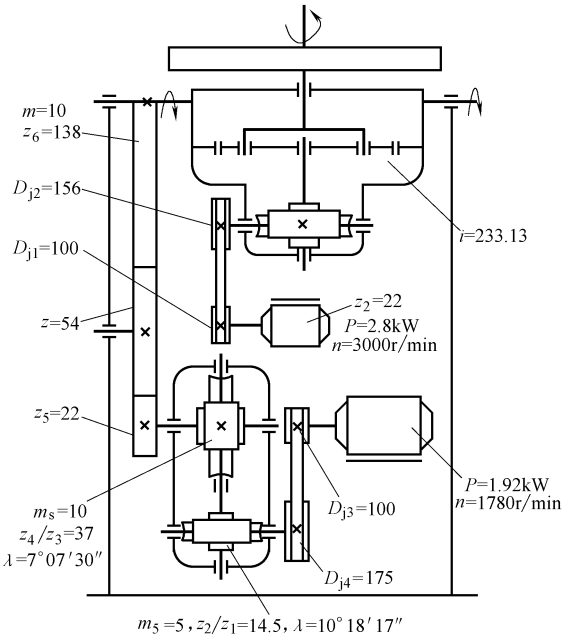


图 5-4-19 变位机的传动机构

表 5-4-2 常用的传动机构

传动类型			传动特点
机械传动	蜗杆传动	圆柱蜗杆传动	传递交错轴间运动,工作平稳,噪声小,传动比大,但传动效率低,单头蜗杆间传动可以实现自锁
		环面蜗杆传动	
		锥蜗杆传动	
	齿轮传动	动轴轮系(渐开线轮系、摆线阵轮传动、谐波传动)	通过摩擦轮的啮合来传递运动和动力,外廓尺寸小,传动比恒定或按照一定函数关系做周期性变化,功率范围广,传动效率高,制造精度要求高,否则冲击和噪声大
		定轴齿轮传动	
		非圆齿轮传动	
	螺旋传动(滑动螺旋传动、滚动螺旋传动、静压螺旋传动)		主要用于将回转运动变为直线运动,同时传递能量和力,弹头螺旋传动效率低,可自锁
	挠性啮合传动(链传动、同步齿轮带传动)		具有啮合传动的一些特点,可实现远距离传动
	摩擦传动	摩擦式无级变速传动	靠接触面间的正压力产生摩擦力进行传动,外廓尺寸较大,由于弹性滑动的原因,其传动比不能保持恒定,但结构简单,制造容易,运行平稳,无噪声,借助打滑能起安全保护作用
		摩擦轮传动	
		挠性件摩擦传动	

(续)

传动类型		传动特点
流体传动	液压传动	速度、转矩可无级调节,具有隔振、减振和过载保护措施,操纵简单,以实现自动控制,效率较低,需要一些辅助设备,如过滤装置;密封要求高,维护要求高
	气压传动	
	液力传动	
	液体黏性传动	
电力传动	直流电力传动	可以实现远距离传动,易控制,在大功率、低速、大转矩的场合使用有一些困难
	交流电力传动	

4.5 焊接自动化专用设备的电气控制系统

4.5.1 焊接自动化专用设备的组成与功能

以图 5-4-20 所示的环缝焊接专机为例,介绍焊接自动化专用设备的电气控制部分。
需要控制的环节有以下方面:

- 1) 运动控制,包括操作机移动臂的升降和平移、变位机的倾斜与旋转、焊接机头上的焊枪位置微调(高低和水平),共有 6 个交流伺服电动机需要驱动和速度控制。
- 2) 焊接系统控制,包括焊接电源的外控(输出电流和电压设定与调节、起弧/熄弧等)、送丝控制、保护气和冷却水控制等。
- 3) 焊接全过程的时序逻辑控制。
- 4) 异常情况的处理。
- 5) 人机交互界面,包括操作面板与手控盒。

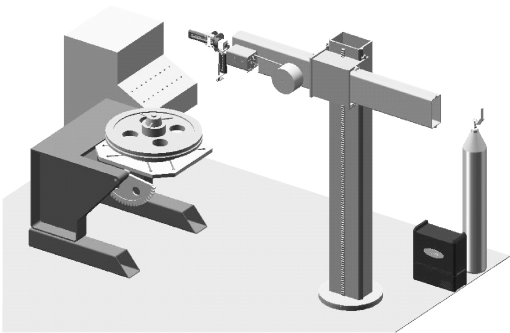


图 5-4-20 环缝焊接专机

完成焊接参数设定与显示、焊接控制命令的输入、工作时序与状态的显示、焊接过程中焊枪位置和焊接参数的微调等。

- 6) 上层管理软件,包括网络通信、文件存储、生产管理等。

为实现上述控制,可设计专机控制系统,如图 5-4-21 所示。

从图 5-4-21 可见,焊接专机的控制系统硬件包括主控计算机(中央控制计算机)、扩展的 I/O 接口、模/数转换接口、网络通信接口、电动机伺服驱动模块、焊接电源外控接口、人机交互界面、手控盒、控制面板、控制柜等。

控制软件包括底层的设备控制和信息采集软件、高层的监控和管理平台。图 5-4-22 是环缝焊接专机的工作流程。焊接专机上层管理软件的功能组成如图 5-4-23 所示。

4.5.2 主控计算机的种类

主控计算机是焊接专机控制系统的核心,需要考虑所需计算能力、运行速度、内存大小、接口种类和数量、稳定性、抗干扰能力等多方面的因素。特别是焊接现场电磁环境很恶劣,强电、高频信号对计算机系统影响很大,在设计时要充分考虑到抗干扰措施的必要性。

目前,可选的控制计算机包括微机系统(PC)、工控机(IPC)、单片机(SCM)、数字信号处理器(DSP)、嵌入式计算机系统、多级控制计算机系统、可编程逻辑控制器(PLC)等。

常见的台式微机系统(PC)功能强大、外扩方便、开发容易、价格低廉。但是抗工业现场电磁干扰能力差,一般可作为上层管理用计算机,很少被选用为现场控制计算机。

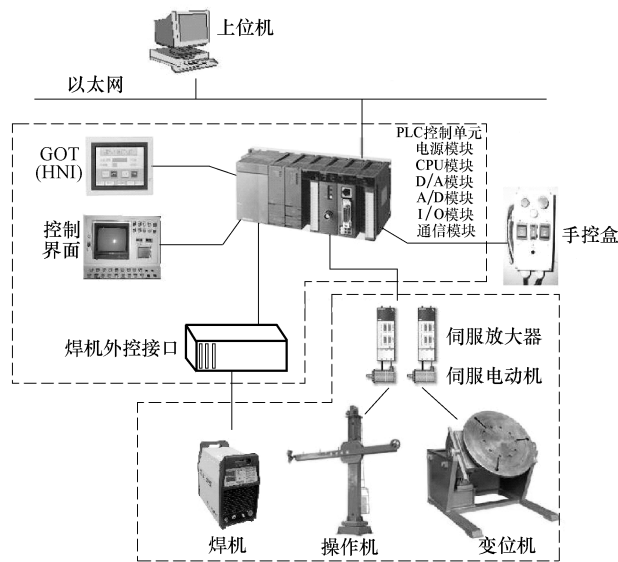


图 5-4-21 焊接专机的典型控制系统组成

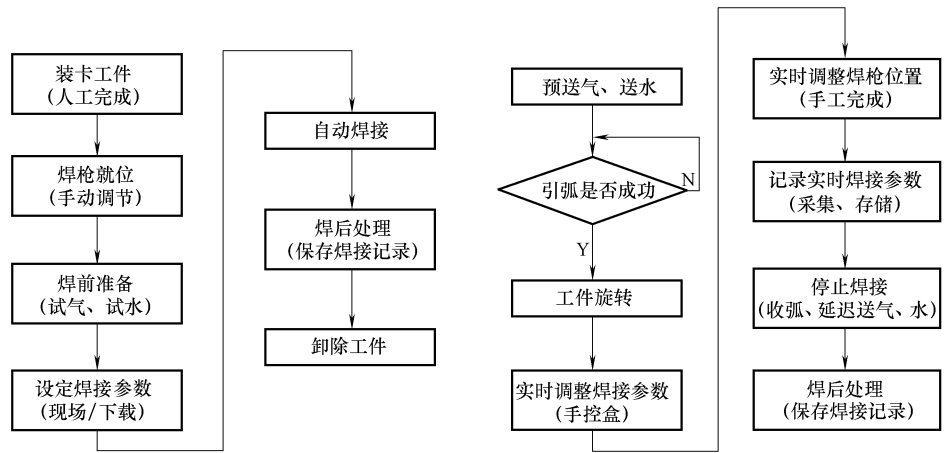


图 5-4-22 环缝焊接专机的工作流程

单片机具有体积小、价格低、功能较强、有一定的抗干扰能力等优点，适合于对单个设备的控制，如弧焊电源、手控盒等。单片机一般不作为大系统的主控计算机。

数字信号处理器（DSP）与单片机相比，运算能力强、I/O 等实时控制能力弱，它一般与单片机联合用于数字化弧焊电源的控制中。

嵌入式系统以应用为中心，软硬件可裁剪，适用于应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等综合性有严格要求的专用场合。在小型的焊接专机中，嵌入式系统有应用。

目前，焊接专机中常用的主控计算机为 PLC 和工控机。就发展来说，它们来自不同的途径，PLC 来源于以继电器为特征的电气逻辑控制，工控机来源于计算机。总体来说，PLC 还是适合于进行以顺序控制为主的自动化工程中。工控机作为控制设备，用于以过程控制为主的自动化工程。

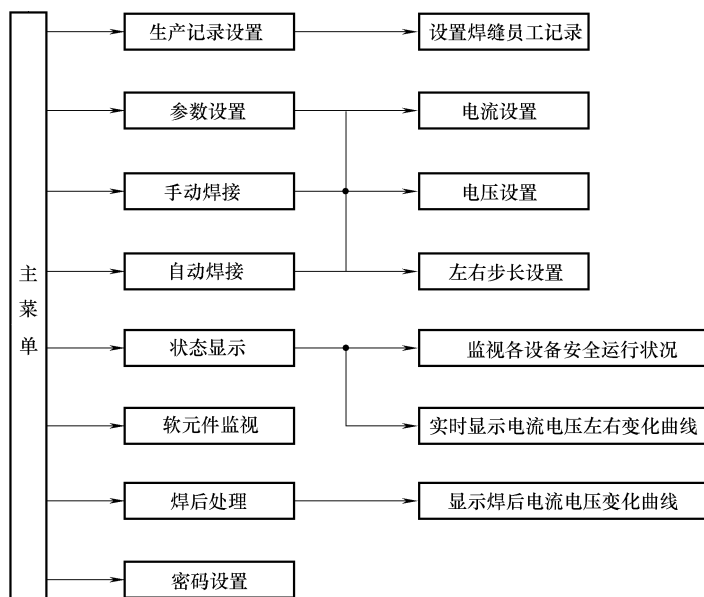


图 5-4-23 焊接专机上层管理软件功能组成

PLC 和工控机的性能对比如下：

- (1) 可靠性方面 都是工业级产品。PLC 的抗干扰能力更强。工控机的软件有时可能不稳定。
- (2) 可扩展性方面 PLC 增加一个功能只需增加相应的模块和修改对应的程序，比较方便。工控机具有很强的扩充能力，最多可扩展 20 多个板卡，但是板卡扩充时需要修改软件，较为复杂。
- (3) 故障诊断能力 PLC 本身具有很强的自诊断能力。而工控机很难诊断出故障元件及原因，使维修周期增加。
- (4) 编程方面 PLC 编程较为方便、简单，很多程序具有通用性。而工控机对于硬件的一些编程较为复杂。
- (5) 接线 PLC 接线简单、清晰。工控机接线涉及板卡，较为复杂，易出错。
- (6) 逻辑控制 PLC 的最大优点还是逻辑控制。工控机的逻辑控制稍差。
- (7) 体积价格 PLC 体积小、价格较为昂贵。工控机体积较大，价格便宜。
- (8) 控制对象的复杂性 PLC 只能控制较为简单的运动。工控机可以进行复杂的运动控制，如多轴插补运动。
- (9) 可控电动机数量及精度 PLC 只能带动少数几个电动机。工控机可以通过增加运动卡来增加控制电动机的数量。工控机可实现更精确的运动控制。
- (10) 控制实时性方面 工控机占优。
- (11) 二次开发 PLC 二次开发困难。工控机具有开放式结构、强大而丰富的软件功能，方便二次开发。
- (12) 适用范围 PLC 适用于比较简单的运动过程。工控机适用于复杂的运动场合，如机器人等。

4.5.3 基于现场总线的控制系统

1. 现场总线控制的发展及其主要组成

- (1) 现场总线的发展过程 控制工业现场控制系统经历了基地式仪表控制系统、电动单元组

合式模拟仪表控制系统、集中式数字控制系统、集散控制系统（DCS）后，在 20 世纪 90 年代发展了现场总线控制系统（Fieldbus Control System, FCS），引起了自动化控制系统结构的变革，其深度和广度超过历史上的任何一次，开创了自动化的新纪元。

现场总线是连接智能化现场设备和控制系统的全数字、双向传输、多分支结构的通信网络，能够在微机监测、监控系统的各个设备间实现双向、多节点、总线式的全数字通信，满足了工业控制网络化、信息化的需求。

焊接自动化的发展方向是焊接过程控制系统的智能化、焊接生产系统的柔性化和集成化。将现场总线控制技术应用于焊接自动化设备中是大势所趋。

（2）现场总线主要组成 图 5-4-24 是一个基于现场总线的焊接工作站的控制系统。总线系统由主站、本地站、远程设备（远程 I/O、远程模拟模块）、智能设备等组成。

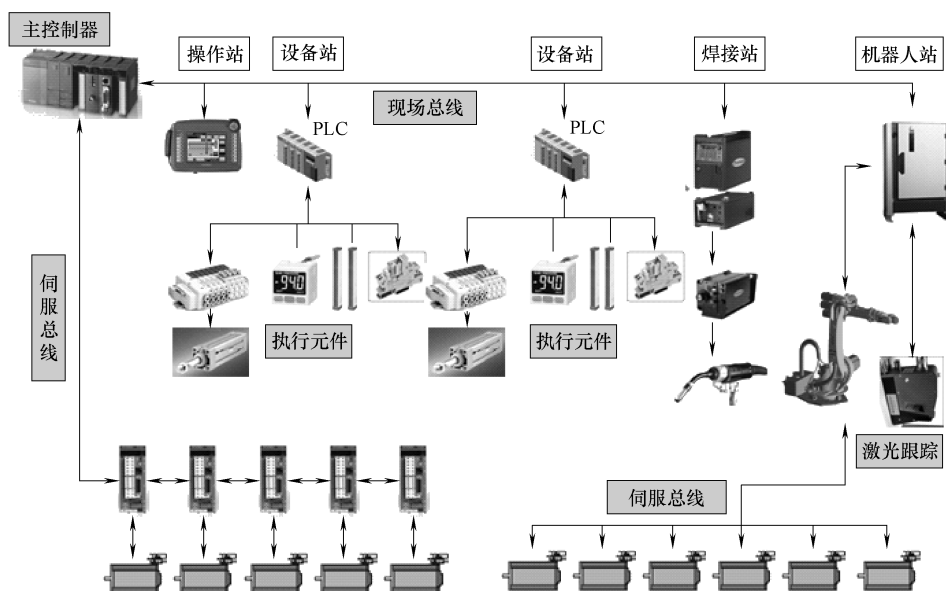


图 5-4-24 基于现场总线的焊接工作站的控制系统

2. 现场总线控制的特点和优势

（1）数字化通信方面 基于 FCS 现场总线的控制系统是数字化车间的基础，作为子系统可以方便地接入车间监控或管理网络，进行数据通信和交换，便于管理和监控。现场总线最高通信速率为 10Mbps，最长距离可达 1200m，完全能够满足系统的通信要求。

（2）费用和周期方面 实际生产线占地面积大，现场采样、操作元件、执行元件较多并且分布在生产线各个位置，如果采用集中控制，线缆铺设连接工作量巨大且很容易发生未可靠连接、短路和断线等人为故障。应用现场总线，采用总线电缆挂接多个设备，在主站与分站之间只要 1 根通信线和 1 根电源线即可完成连接，连线设计与接头校对的工作量大大减少，降低了硬件和人员方面成本。

（3）系统可靠性方面 人工布线和施工量的减少降低了人员出错的几率；总线采用数字通信方式，减少了传送误差，信号传输距离远，系统的工作可靠性得到提高。

（4）抗干扰方面 焊接现场是一个比较恶劣的外部环境，现场总线的应用减少了线缆的数量，降低了受到干扰的可能性。

(5) 调试维护方面 现场总线设备具有自诊断与简单故障处理的能力，主控系统可以集中判断和显示大部分的故障信息，操作者可方便地查询设备的运行状态、维护信息。

4.5.4 焊缝跟踪控制与过程监视系统

在自动化焊接中，为了进一步提高焊接质量、增强焊接专机的适应能力、降低操作者的劳动强度、改善操作环境，有时，需要配备焊缝跟踪传感器、弧长控制器和焊接过程监视系统等焊接质量保证装置。

(1) 焊缝跟踪传感器 目前，实用的焊缝跟踪传感器主要有探针接触式（见图 5-4-25）、激光视觉传感器（见图 5-4-26）、电弧跟踪传感器等，它们的工作原理在前述章节中已有详细的介绍。

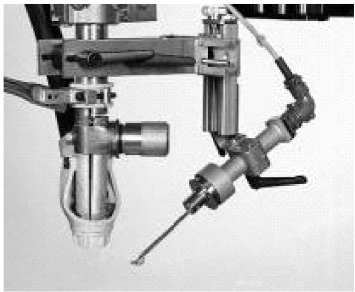


图 5-4-25 探针接触式焊缝跟踪传感器

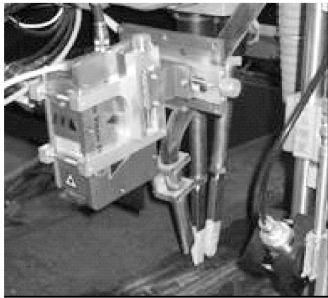


图 5-4-26 激光焊缝跟踪

(2) 弧长控制器 在重要产品的 TIG 或等离子焊接中，为了避免弧长变化对焊缝质量造成的影响，需要配备弧长控制器。图 5-4-27 是 Jetline 公司生产的弧长控制器。

(3) 焊接过程监视系统 焊接过程监视系统（见图 5-4-28）的作用一方面是改善作业环境，让操作者远离焊接区；另一方面有利于封闭环境下焊接过程的观察。



图 5-4-27 弧长控制器



图 5-4-28 焊接过程监视系统

4.6 焊接自动化专用设备的设计

从上述内容可见，焊接自动化专用设备是一个机械、电子、控制、焊接相结合的复杂系统。其任务是完成某一特定产品的自动化焊接。焊接自动化专用设备在设计上有特殊性，其设计流程如图 5-4-29 所示。

焊接自动化专用设备的设计基本思路和原则如下：

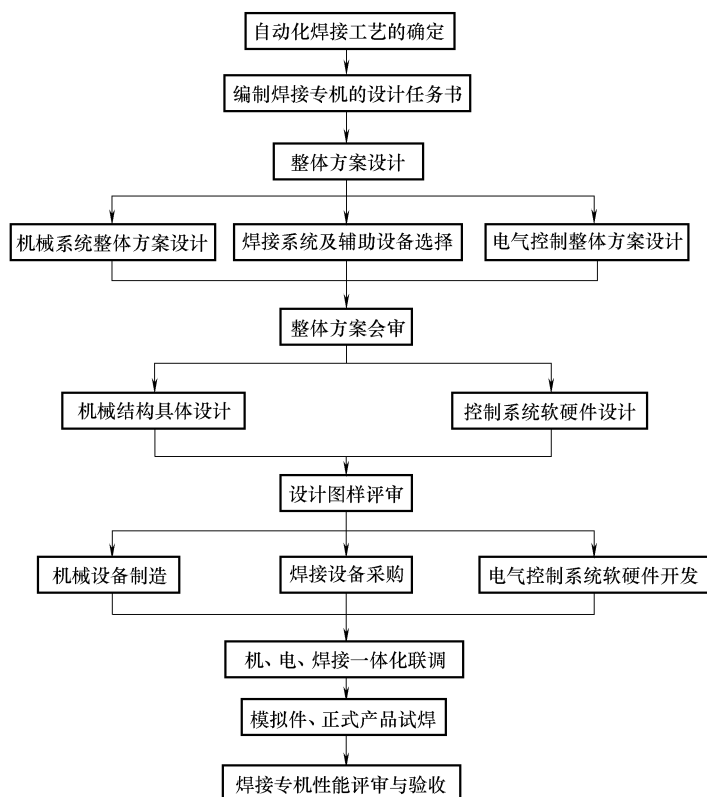


图 5-4-29 焊接自动化专用设备的设计流程

(1) 焊接工艺先行 首先要确定自动焊接工艺,包括工件结构、材料、板厚、接头形式、焊接方法、焊接参数等,这些是很重要的。原先适合手工焊的焊接参数不一定原封不动地适合自动化焊接,例如,可能存在焊枪的可达性问题;自动化焊接可以使用更高效的焊接方法,可以选用稍粗一些的焊丝和大一些的焊接参数以提高焊接效率;自动化焊接可以在不停焊的情况下改变焊接参数;自动化焊接时对工件坡口准备质量和焊缝安装位置精度的要求、是否需要焊缝跟踪和弧长控制环节,这些都需要事先确定。

(2) 整体方案设计是最重要的一环 应从总目标出发,对所要设计的机、电、焊一体化系统的各方面,本着简单、实用、经济、安全和美观等基本原则,进行综合性、优化性设计。

(3) 整体设计中应有虚拟设计环节 对设备的总体布局、工件的装卸、焊缝的装卡定位、焊枪的运动轨迹生成、焊枪的可达性、焊接时序等进行仿真设计,及时发现问题,早期修改。

(4) 焊接系统及配套设备要提前确定 包括焊接电源型号、外控方式、体积大小、送丝机型号、送丝方式、送丝盘大小和安装位置、保护气的要求、焊缝跟踪器型号规格、弧长控制器型号规格等。以方便后续的机械、电气设计。

(5) 机械系统设计 包括设备布局、机架设计、传动设计、电动机选择、焊枪机头设计、工装卡具设计、焊件变位机械设计等。

(6) 电气控制设计 包括控制系统整体设计、信号流程、统计所需控制接口的数量和种类、中央控制计算机选择、接口资源的选择、隔离措施、电路设计、人机交互界面的设计、控制柜的设计、控制软件的编制等。

下面以一个轨道式管道全位置焊接专机的设计为例来说明。

所设计的管道全位置焊接专机如图 5-4-30 所示。

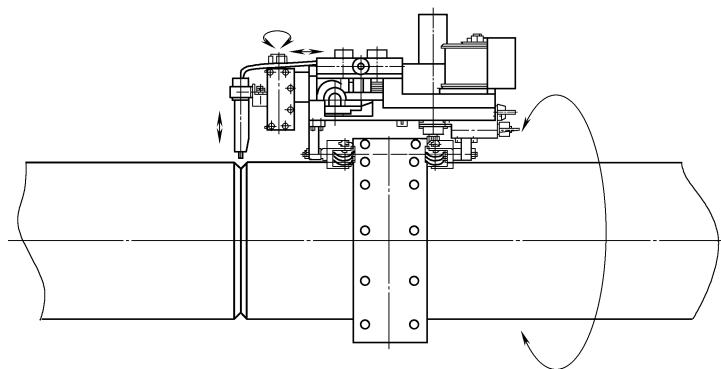


图 5-4-30 管道全位置焊接专机示意图

(1) 设计要求

所焊管道外径：400mm 以上；壁厚：30 ~ 50mm；坡口：U 形坡口、对接间隙 0.5mm、根部厚度 2mm。

材料：不锈钢、低碳钢和低合金钢。

焊接方法：TIG 脉冲焊，分打底焊和盖面焊，自动送丝，具有脉动送丝功能。

区段焊接参数自动调整：立焊、仰焊、上坡焊、下坡焊。

需要弧长自调节装置、视觉图像监视系统，手控盒，焊枪高度手动调整。

机头行走速度：100 ~ 1500mm/min。

送丝速度：100 ~ 15000mm/min。

焊枪横向摆动，摆幅： $\pm(1 \sim 20)$ mm，两边停留时间：0 ~ 4s，摆动频率：0 ~ 20Hz。

(2) 机械设计 机械设计包括柔性齿圈、焊枪高度调整和横向摆动机构、送丝机构、机头行走机构等。

柔性齿圈采用钢板制作，侧面传动齿模数 0.5，应进行表面处理以增加耐蚀性及耐磨性，双排支撑螺栓，使导环固定安装及调整方便，容易操作。

行走电动机及减速器、焊枪高度自动调节电机及升降机构、横向调节电机及滑动支撑机构、焊枪摆动电机、安装焊枪的接口、控制线接线板、水和气接口、送丝机构等应紧凑地安装在一起，共同组成焊接机头。

(3) 电气控制设计 需要控制的环节有以下方面：

1) 机头行走电动机：采用直流伺服电动机，需要一路模拟量输出控制行走速度，两路开关量控制走/停、正反转。

2) 焊枪摆动电动机：采用直流伺服电动机，需要一路模拟量输出控制摆动速度。

3) 送丝机：一路模拟量输出控制送丝速度；一位开关量控制送丝工作/停止。

4) 焊接电流调整：一路模拟量输出控制焊接电流。

5) 其他开关量：包括焊接电源开关、保护气开关等。

采用两级计算机控制结构，如图 5-4-31 所示。主计算机采用系统计算机，负责完成数据管理工作；各个现场控制级计算机采用单片计算机，实现各个功能模块的控制，主机与现场控制级计算机之间采用标准 RS-232 串行通信进行信息的交换。

根据全位置管焊机的工作流程，建立了图 5-4-32 所示的操作界面。

需要管理的数据很多，允许存储 1000 个焊接程序，每个焊接程序包括需要焊接的道数，每焊

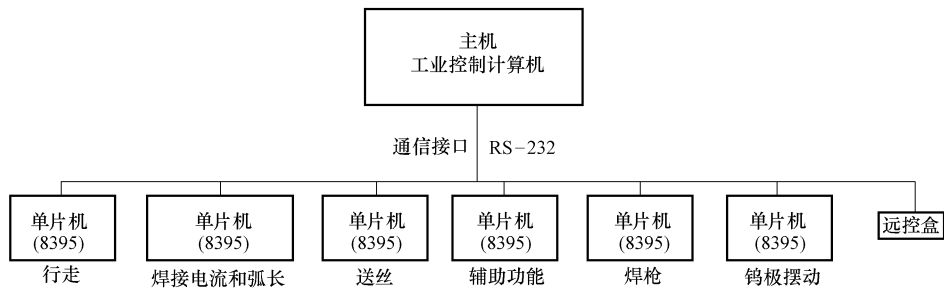
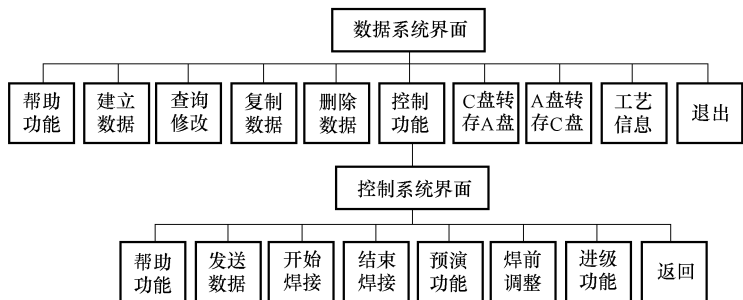


图 5-4-31 控制系统



管道全位置TIG焊数据系统				
帮 助	组数: 1	道数: 1	级数: 1	
建立数据	焊接引弧电流 20	行走准备时间 1.0	送丝准备时间 1.0	
查询修改	焊接基值电流 80	行走初始速度 30	送丝开时时间 1.0	
复制数据	焊接峰值电流 120	行走开始延时 1.0	送丝上坡时间 1.6	
数据删除	焊接熄弧电流 60	行走上坡时间 1.5	送丝初始速度 400	
C转存A	电流开始延时 1.5	行走工作速度 80	送丝基值速度 600	
A转存C	电流上坡时间 3.0	行走下坡时间 1.5	送丝峰值速度 800	
工艺信息	电流下坡时间 2.0	行走结束速度 30	送丝下坡时间 1.6	
工作状态	电流结束延时 1.0	行走结束延时 1.0	送丝结束速度 400	
退 回	电压上坡时间 3.0	行走工作方向 左	送丝结束延时 0.5	
	电压下坡时间 1.5	起 始 摆 幅 20	送丝准备时间 1.0	
	焊接基值电压 8.0	上坡摆幅增量 5	摆幅开始时间 1.0	
	焊接峰值电压 8.5	结束摆幅 60	摆幅内摆角度 30	
	中间运行时间 0.5	下坡摆幅减量 5	钨极外摆角度 30	
	内端停留时间 0.5	预备送气时间 5	进级时间 60	
	外端停留时间 0.5	延迟关气时间 10	进级方式 自动	
		送丝方式 自动	摆动方式 钨极	
	保存数据	确认	否认	

图 5-4-32 操作界面

道采用的焊接参数，包括行走速度、送丝速度、摆动参数、不同焊接位置时的电流参数等多达几十个数据，主计算机的主要工作就是数据的管理和参数修改，以及将命令通过 RS-232 串行通信接口分别发送给相应的现场控制级计算机。

手控盒需要完成的功能有：焊接前焊枪位置的调整；焊接过程中参数的调整；焊接过程的预演；开始焊接等控制命令的下达；工作状态与数据显示。

4.7 典型焊接自动化专用设备

下面按照所焊焊缝的类型不同列举几类典型的焊接自动化专用设备，力求使读者有一个感性认识。

4.7.1 板材拼接直缝焊接专机

1. 薄板拼接焊接专机

薄板焊接易变形,需要采用琴键式夹紧装置,并且焊前要进行定位焊。琴键式夹紧机构可以在焊缝的全长上施加均匀压力,加快焊缝冷却速度,减少焊接变形。琴键的压力通常采用气压软管并借助杠杆机构传递。常用焊接方法为 TIG 焊,单面焊双面成形,焊缝反面加成形垫板。弧长控制器(AVC)是可选设备。图 5-4-33 是典型的直缝焊接专机。

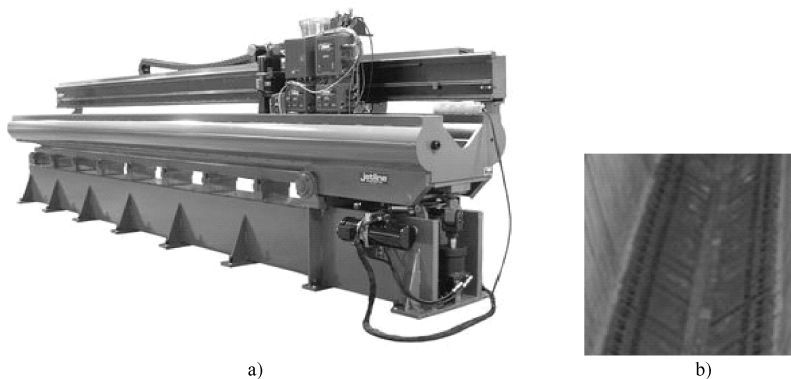


图 5-4-33 直缝焊接专机
a) 直缝焊接专机 b) 琴键式夹紧装置

从图 5-4-33 可见,焊接专机由机架、侧梁导轨、琴键式夹紧机构、行走小车及驱动机构、焊枪十字滑架调节机构、送丝机、弧长控制器和系统控制器等组成。

2. 厚板拼接焊接专机

厚板拼接在造船、压力容器等行业应用很多。由于厚板工件大、重,采用工件不动、焊枪运动的焊接方式。多采用门式操作机结构。焊接方法为单丝或多丝埋弧焊、双丝 GMAW 焊、窄间隙焊等高效工艺方法。图 5-4-34 所示为各种厚板拼接焊接专机,图 5-4-35 所示为厚板焊接机头。

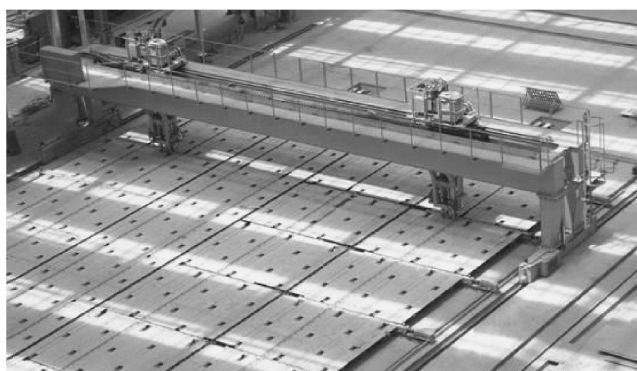


图 5-4-34 厚板拼接焊接专机

4.7.2 筒体纵缝焊接专机

几种典型的筒体纵缝焊接专机如图 5-4-36 所示。

纵缝分为外纵缝、内纵缝。需要考虑筒体的直径和长度。图 5-4-36a 的筒体纵缝焊接专机适用

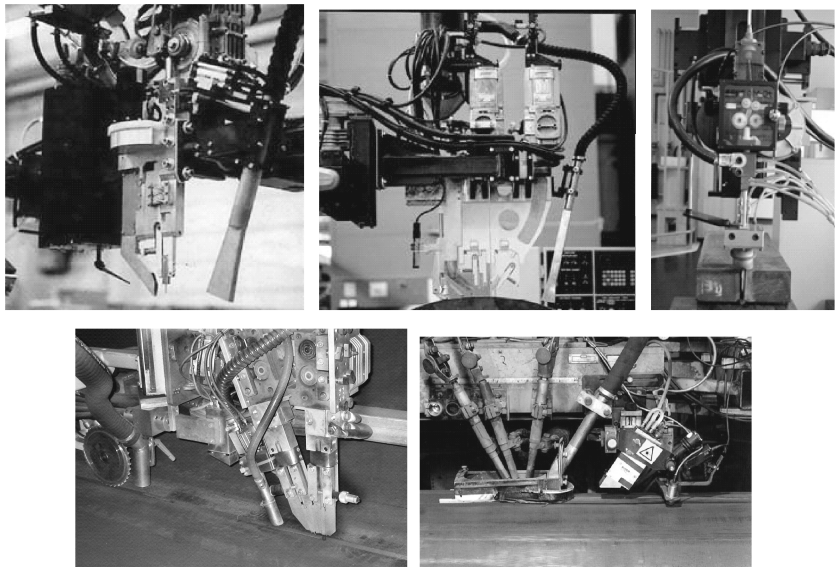


图 5-4-35 厚板焊接机头

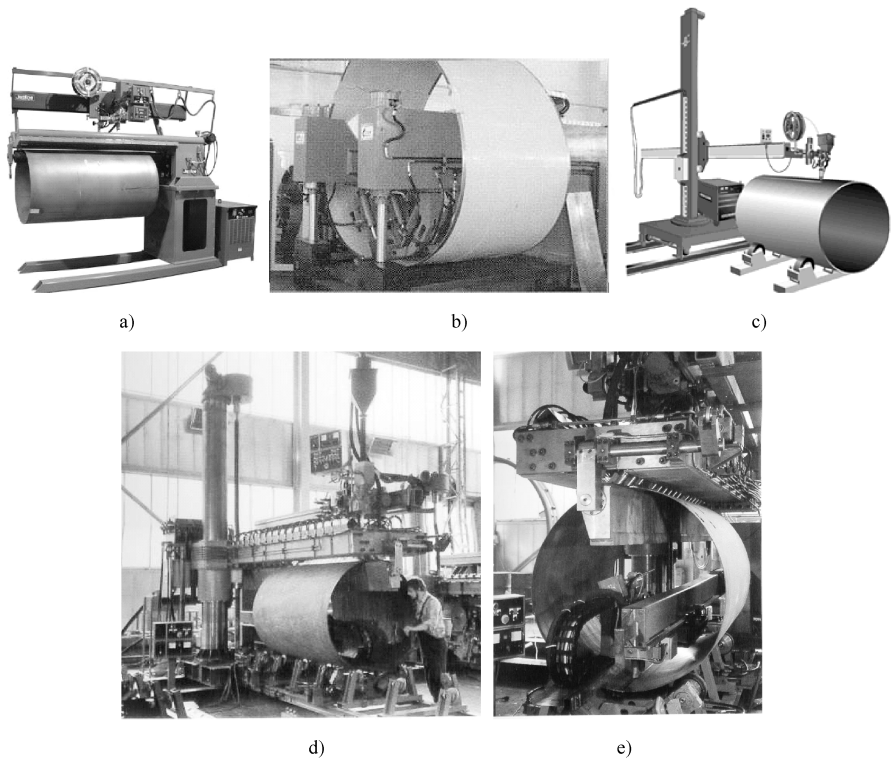


图 5-4-36 筒体纵缝焊接专机

a) 外纵缝焊接 b) 内纵缝焊接 c) 外纵缝通用自动焊 d)、e) 外、内纵缝的同时焊接

于小直径、短的筒体。焊接时，筒体纵缝在专机的心轴上。当焊接直径较大的筒体时，必须加大机架的高度。这样不仅降低了机架稳定度，而且给焊工操作带来不便。内纵缝自动焊专机通常用于大直径的筒体焊接，压紧机构的悬壁梁设计成了 V 形结构，可将筒体穿过悬壁梁和侧梁导轨，在筒

体的内侧进行纵缝焊接。图 5-4-36c 的外纵缝通用自动焊专机适用于较长的筒体焊接, 筒体的直径变化范围可以较大。图 5-4-36d、e 是同时焊接外、内纵缝的焊接专机。内纵缝焊接应配备图像监控系统和遥控操作台, 以便于焊工观察焊接过程。

4.7.3 环缝焊接专机

筒体(管子)环缝焊接专机分为两大类。第一类是焊枪不动、筒体(管子)旋转; 第二类是被焊筒体(管子)固定不动, 焊枪绕工件做圆周运动, 进行全位置焊接。

1. 工件运动的环缝焊接专机

几种典型的焊枪不动、工件旋转的环缝焊接专机如图 5-4-37 所示。图 5-4-37a、b 的专机由焊接操作机、旋转/倾斜变位机、焊接系统、控制系统等组成。工件安装在变位机上做旋转运动。图 5-4-37c 上的工件安装在头尾架焊接翻转机上。对于较大、较重的筒体环缝焊接一般采用操作机加滚轮架的通用模式, 如图 5-4-37d 所示。

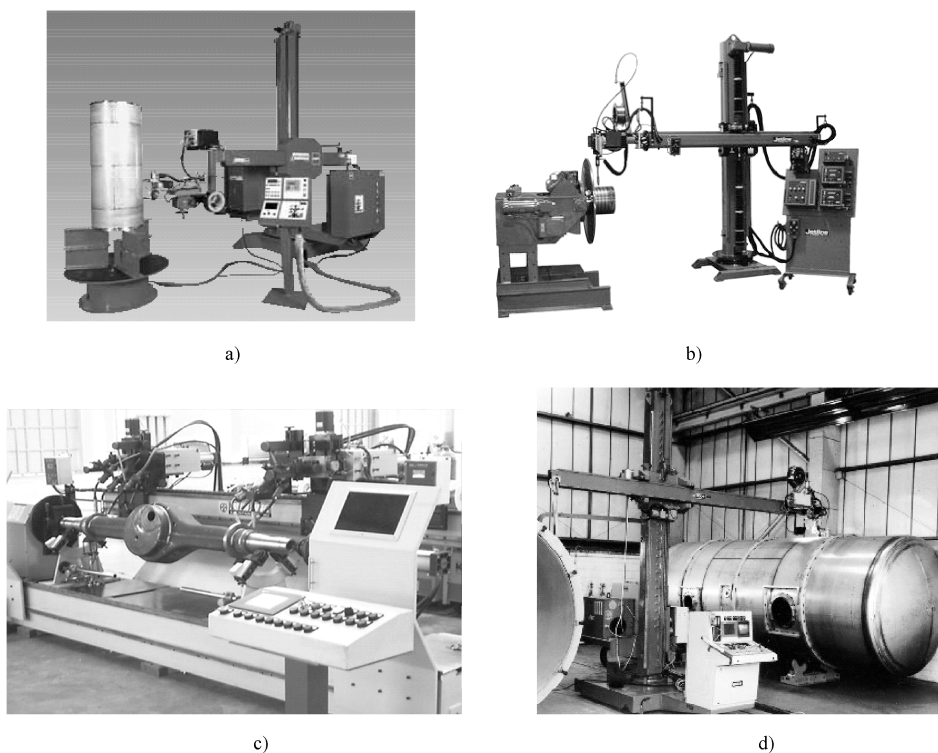


图 5-4-37 工件运动的环缝焊接专机

a)、b) 小型环缝焊接专机 c) 头尾架焊接翻转机 d) 筒体环缝焊接操作机加滚轮架的通用模式

2. 全位置自动管-管焊接专机

当被焊管件不能旋转或不方便旋转时, 需要采用全位置自动焊管专机。焊接时, 焊接机头绕工件做圆周运动, 这类焊管机称为轨道式旋转自动焊管机。

根据焊管专机的结构和所焊管子的直径不同, 分为封闭式全位置管-管焊接专机、开放式全位置管-管焊接专机、爬行小车轨道式全位置管-管焊接专机三种。

(1) 封闭式全位置管-管焊接专机 封闭式全位置管-管焊接机头如图 5-4-38 所示。焊接过程在封闭的环形空腔内完成, 焊接熔池保护良好, 焊缝质量优异。这种机头可焊的管径范围为 $\phi 1.6 \sim \phi 170\text{mm}$, 最大可焊管壁厚度为 3.0mm 。其特点是结构紧凑, 装夹操作方便。缺点是只能进

行不添丝的 TIG 单道焊。



图 5-4-38 封闭式全位置管-管焊接机头

(2) 开放式全位置管-管焊接专机 典型的开放式全位置管-管焊接机头如图 5-4-39 所示, 由夹紧机构、焊枪旋转运动机构、焊枪位置微调机构、气水电接口等组成。工作时, 通过夹紧机构直接固定在被焊管件上, 焊枪的旋转中心始终与管子保持同心。焊接方法一般为 TIG 焊, 分填丝和不填丝两种。可以焊接的管径范围为 $\phi 20 \sim \phi 275\text{mm}$, 最大可焊管壁厚度为 13mm。弧长控制器是可选项。



图 5-4-39 开放式全位置管-管焊接机头

(3) 爬行小车轨道式全位置管-管焊接专机 典型的爬行小车轨道式全位置管-管焊接专机如图 5-4-40 所示, 由爬行小车、刚性环形导轨、焊枪微调机构、送丝机、焊枪摆动机构、弧长控制器等组成, 主要用于大直径厚壁管的焊接。焊接方法可以是 TIG 填丝多层焊、单丝或多丝 GTAW 焊、窄间隙焊等, 也可以是多焊枪一起工作, 如图 5-4-41 所示。

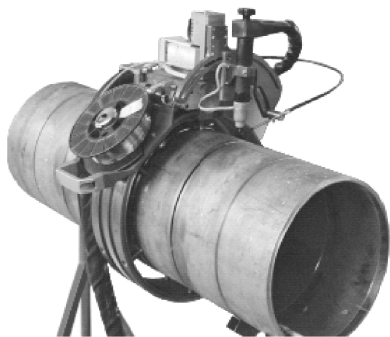


图 5-4-40 全位置管-管焊接专机

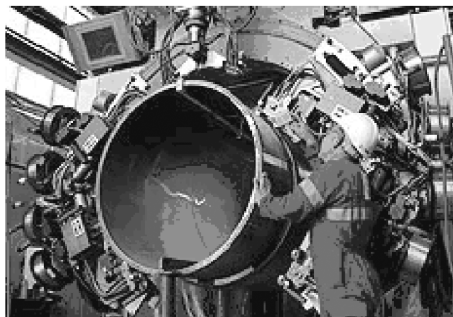


图 5-4-41 多工位（四焊机头）全位置焊管机

操作要点如下：

- 1) 环形导轨安装时应保证与管子同心，导轨边缘应与焊缝平行。
- 2) 全位置焊接时，爬行小车的行走速度应保持均匀一致。
- 3) 在平焊、仰焊、上坡焊、下坡焊等不同位置时，焊接参数需要进行相应调节。
- 4) 弧长控制器是必要的。

4.7.4 管板自动焊接专机

管板接头在冷凝器、管式热交换器和蒸发器等产品上大量应用，分为管伸出、管平齐、管内缩等几种情况，以管外伸式接头最常见。在一个热交换器中，管板接头数量多、密集，质量要求严格。

管板接头自动焊接需要解决快速定位、焊枪旋转、焊接参数调节等难题。

管板焊接专机的工作情况如图 5-4-42 所示。典型的管板焊接机头如图 5-4-43 所示。

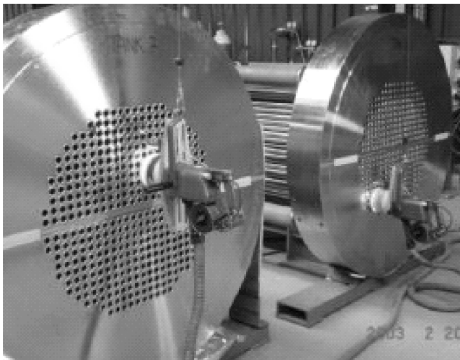


图 5-4-42 管板焊接专机的工作情况

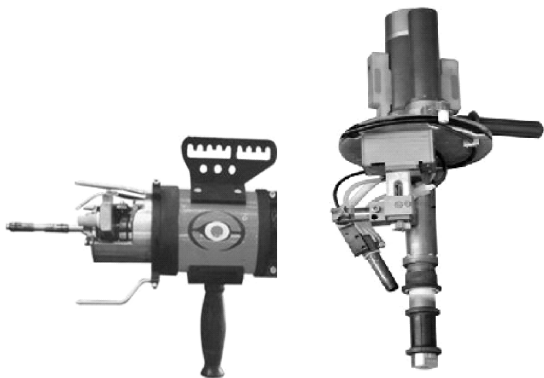


图 5-4-43 典型的管板焊接机头

管板焊接机头是管板焊接系统中最关键的。机头常采用平面三点支撑、心轴插入管子内孔进行定位和对中。焊接时，TIG（或 MIG）焊枪绕管子外圆自动旋转 $365^{\circ} \sim 370^{\circ}$ ，自动完成整圈焊缝的焊接。焊枪旋转过程中，电缆线、气管、水管不能产生缠绕，需要设计特殊机构。

根据管壁厚度和接头强度要求的不同，分别采用 TIG 自熔焊和填丝 TIG 焊，或者 MIG 焊。

管板焊接系统一般需要具有电弧长度控制、气流控制、电流控制、焊枪旋转控制、送丝控制、枪头横摆控制以及分区设置等控制功能。某管板焊接专机的技术指标见表 5-4-3。

表 5-4-3 某管板焊接专机的技术指标

管板连接形式	管外伸、管平头	焊接管子直径	10 ~ 70mm
焊枪旋转速度	0.2 ~ 6.5r/min	弧长调节距离	15mm
焊枪倾斜角度	$0^{\circ} \sim 30^{\circ}$	最大焊接电流	300A
送丝速度调节	0 ~ 1700mm/min	焊丝直径	0.8mm、1.0mm
冷却方式	多重水冷	重量	10kg

参 考 文 献

[1] 陈裕川. 大型自动化焊接设备的国内外现状及发展趋势 [J]. 电焊机, 2002, 32 (10): 1-7.
[2] 赵熹华. 焊接方法与机电一体化 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
[3] 王政. 焊接工装夹具及变位机械——性能、设计、选用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
[4] 陈裕川. 现代自动化专用焊接设备设计概论 (一) [J]. 现代焊接, 2006, (12): 6-9.

-
- [5] 陈焕明. 焊接工装设计 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2006.
- [6] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [7] 胡德安, 陈益平, 李唐柏, 等. 现场总线在焊接自动化中的应用 [J]. 电焊机, 2003, 33 (5): 3-6.
- [8] 李宪政. “2009 中国焊接产业论坛——焊接自动化会议”技术总结 [C]. 北京: 中国焊接产业论坛——焊接自动化会议委会, 2009.
- [9] 中国焊接协会焊接设备专业委员会及中国电器工业协会电焊机分会. 第十四届北京·埃森展后技术报告——焊接设备和功能部件 [C]. 北京: 中国机械工程学会北京埃森焊接与切割展览会组委会, 2009.

第5章 焊接机器人

本章系统阐述焊接机器人的基本知识，包括概念、分类、工作原理、系统构成、实际应用及焊接机器人的最新技术等。

5.1 概述

焊接机器人是工业机器人的一种，是柔性自动化焊接的典型代表，它的出现带来了焊接自动化方式的革命性进步。焊接机器人技术融合了机器人技术、焊接技术和系统集成技术。焊接机器人的应用日益广泛，焊接自动化、机器人化是焊接生产的发展方向。

5.1.1 工业机器人的定义、特点和分类

1. 工业机器人的定义

国际标准化组织（ISO）对工业机器人的定义如下：“工业机器人是一种自动控制的、可再编程的、多功能的、三个以上可编程轴的机械手”。从定义可见，工业机器人强调通用性、可再编程的柔性、自动控制。

焊接机器人就是一种能完成焊接任务的工业机器人。

2. 焊接机器人的优点

- 1) 提高焊缝质量的稳定性。机器人焊接时，焊接参数如焊接电流、焊接电压、焊接速度、送丝速度、弧长等都是设定的，不受人的因素影响，因此焊接质量是稳定的。
- 2) 提高焊接生产率。焊接工位与装配工位并行工作；机器人移动速度快可明显减少移位的辅助时间；机器人焊接的燃弧率可达85%以上；大功率焊接；一天可以24h连续生产。
- 3) 可实现空间三维复杂形状焊缝的焊接。
- 4) 焊接生产实现柔性自动化。缩短产品改型换代的准备周期，减少相应的设备投资，特别适合于小批量、个性化的生产方式。
- 5) 改善工人劳动条件和降低对工人操作技术要求。可以把工人从高温、强光、烟尘和强体力劳动的环境中解脱出来。
- 6) 便于在恶劣环境作业。能在空间站建设、核能设备维修、深水作业等极限环境下完成人工难以进行的焊接任务。
- 7) 增强生产管理的计划性和可预见性。

3. 焊接机器人的分类

(1) 按发展程度和智能水平分 一般可分为如下三类：

第一代是示教再现型机器人。这类机器人不具备外界信息的反馈能力，很难适应变化的环境。目前大量地应用的是这类机器人。

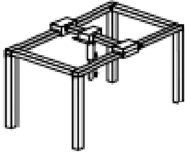
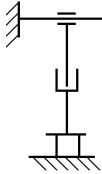
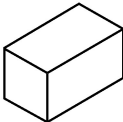
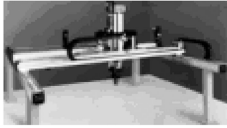
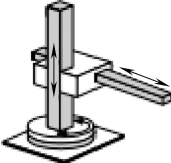
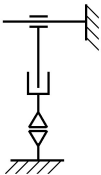
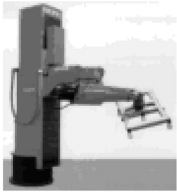
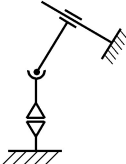
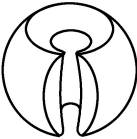
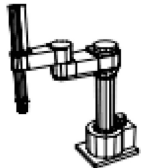
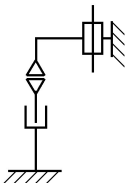
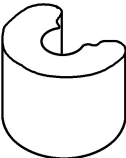
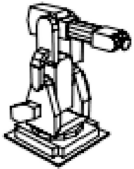
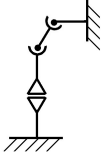
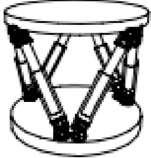
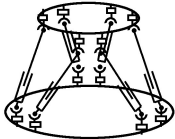
第二代是具有一定感知能力的机器人。它们对外界环境有一定的感知和反应能力，具备如听觉、视觉、触觉等功能，根据传感器获得的信息灵活调整自己的工作状态，保证能够在简单的动态环境中完成预期的任务。这类机器人现已进入应用研究的阶段。

第三代是智能机器人。它不仅具有很强的感知能力，而且具有独立的判断、行动、记忆、推理和决策的能力，甚至具有任务级的编程能力，因而操作者可以通过非常简单的操作使之完成更加复

杂的任务。这一代机器人正处于试验研究阶段。

(2) 按结构形式分 工业机器人按结构形式分为直角坐标型、圆柱坐标型、球坐标型、SCARA 型、关节坐标型、并联型等,见表 5-5-1。

表 5-5-1 工业机器人的不同结构形式

机器人类型	运动学结构	工作空间	实例	优缺点
 直角坐标型				优点:位置精度高,控制无耦合、简单,避障性好等 缺点:结构庞大,动作范围小,灵活性差,协调性差
 圆柱坐标型				优点:位置精度仅次于直角坐标型,控制简单,避障性好 缺点:结构庞大,协调性差,两个移动轴设计复杂
 球坐标型				优点:占地小,结构紧凑,重量轻,位置精度尚可,能协调 缺点:避障性差,平衡问题,位置精度与臂长有关
 SCARA 型				优点:垂直方向刚性高,水平面内刚性低(柔顺性),能更简单地实现二维平面上动作,主要用于装配作业中
 关节坐标型				优点:最紧凑,灵活性大,占地最小,工作空间最大,协调性好,避障性好 缺点:位置精度较低,平衡及控制耦合问题,比较复杂
 并联型				优点:刚度高,可完成复杂曲面的加工 缺点:控制复杂,工作范围小,精度低一些

5.1.2 工业机器人的发展历史

1. 工业机器人的诞生期

1950~1979年为工业机器人的诞生期。

1951年 Raymond Goertz 为原子能委员会设计了一个装有遥操作的关节机械臂。

1954年 George Devol 设计了第一台可编程机器人，并创造了专用名词“通用自动化”，被称为“机器人之父”。

1956年 Devol 和 Joseph Engelberger 创立了世界第一个机器人公司，其设计的第一台机器人 Unimation 如图 5-5-1 所示。

1959年 MIT 自动控制实验室论证了计算机辅助制造的可行性。行星公司推出了第一台商品化机器人。

1960年通用电子开发了一个重 1362kg 的四条腿机器人，它可以每小时行走 6.436km。

1960年 Condec 公司购买了 Unimation，开始发展 Unimation 机器人系统。同年，AMF 公司推出了 Harry Johnson 和 Veljko Milenkovic 设计的商品化 Versatran 机器人。

1961年 UNIMATE 工业机器人第一次出现在新泽西通用汽车生产线上，负责点焊和抓取压铸件。

1963年设计了第一个由计算机控制的人造机械臂 Rancho 臂，用于帮助残疾人，六关节结构使其具有像人臂一样的灵活性。

1964年 MIT、斯坦福研究所、斯坦福大学和爱丁堡大学分别建立人工智能研究实验室。

1968年日本川崎重工通用自动化公司获得机器人的生产许可权。

1969年出现的斯坦福机械臂是第一个电动的、计算机控制的机器人臂。

1970年出现了第一个人工智能控制的移动机器人。

1971年建立了日本工业机器人协会（JIRA）。

1973年 Richard Hohn 开发了第一个商品化的微机控制的工业机器人，被称为 T3，寓意未来的工具。

1974年出现了第一个使用触觉和力传感反馈的装配机器人。斯坦福臂的开发人 Scheinman 教授建立了 Vicarm 机器人公司。

1978年 Vicarm 和 Unimation 推出了著名的 PUMA（可编程通用装配机器）机器人。

2. 工业机器人的蓬勃发展期

1980年至今为工业机器人的蓬勃发展期。

1980年机器人工业开始快速发展，几乎每个月都有新机器人或机器人公司产生。

1980年后，机器人研究重点转为自主机器人和遥操作机器人，用于完成危险性工作。

1996年 KUKA 首推 6D 鼠标实时操作机器人技术。

1999年 KUKA 为机器人增加网络远程诊断功能。

2003年 KUKA 推出第一个载人机器人，展示其灵活性和安全性。

2007年 KUKA 推出负重 1000kg 的重型机器人。

2009年 MOTOMAN 展出 7 轴机器人 IA20，在 6 轴的基础上增加冗余轴，具有很好的动作灵活性，适合在狭小空间作业。

2012年 MOTOMAN 机器人展出多机协调控制技术，一台控制器最多能控制 8 台机器人、72 个



图 5-5-1 第一台机器人 Unimation

轴,实现各种组合的同时运动。

5.1.3 工业机器人的现状

根据机器人国际联盟(IFR)的统计,截止到2011年全世界的在役工业机器人约为115万套,预测到2015年,将达到160万套左右,如图5-5-2所示。日本继续保持机器人王国地位,美国和德国分列二、三位。在众多种类的工业机器人中,大约一半的工业机器人是焊接机器人。

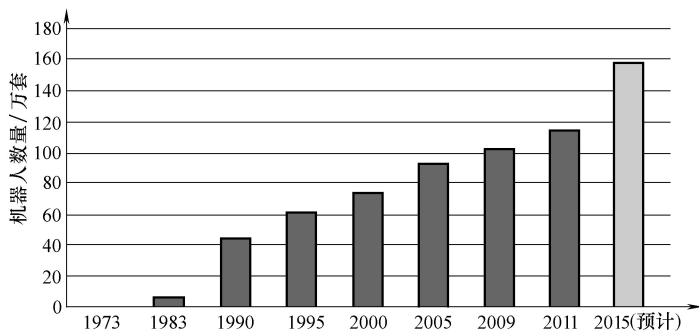


图 5-5-2 各年全世界在役机器人数量统计(来源: IFR 统计报告)

我国在20世纪70年代末开始进行工业机器人的研究。1985年哈尔滨工业大学研制成功国产第一台焊接机器人-HRGH-I型弧焊机器人;1987年研制成功HRGD-I型点焊机器人;1989年以国产机器人为主的汽车装焊生产线投入生产,标志着国产机器人实用阶段的开始。据不完全统计,最近几年我国工业机器人出现了爆炸式增长,平均每年的增长率都超过40%,在弧焊和点焊领域的增长率都超过了60%。

目前,著名的机器人公司有美国的Adept,日本的安川、OTC、松下、FANUC、不二越、川崎等,德国的KUKA、CLOOS,瑞典ABB,意大利COMAU,奥地利IGM等。

为了对最新的工业机器人的性能有一个直观的了解,下面以KUKA公司的KR16机器人(见图5-5-3)为例,介绍机器人的典型性能指标(见表5-5-2)。

5.1.4 常用机器人术语

(1) 机械手(Manipulator) 又称操作机。具有和人臂相似功能的机械装置。

(2) 末端执行器(End Effector) 位于机器人腕部末端,为直接执行工作要求的装置,如焊枪/焊炬、焊钳等。

(3) 位姿(Pose) 工业机器人末端执行器在指定坐标系中的位置和姿态。

(4) 工作空间(Working Space) 工业机器人执行任务时,其腕轴交点能在空间活动的范围。

(5) 工作原点(Work Origin) 工业机器人工作空间的基准点。

(6) 机械原点(Mechanical Origin) 工业机器人各自由度共用的机械坐标系中的基准点。

(7) 速度(Velocity) 机器人在额定条件下,匀速运动过程中,机械接口中心或工具中心点在单位时间内所移动的距离或转动的角度。



图 5-5-3 KUKA 公司的 KR16 机器人

表 5-5-2 KR16 机器人的主要性能参数

结构形式		多关节
最大工作半径		1611mm
每轴最大运动范围	S 轴(腰)	$\pm 185^{\circ}$
	L 轴(臂)	$+35^{\circ}/-155^{\circ}$
	U 轴(肘)	$+154^{\circ}/-130^{\circ}$
	R 轴(腕横摆)	$\pm 350^{\circ}$
	B 轴(腕俯仰)	$\pm 130^{\circ}$
	T 轴(腕回转)	$\pm 350^{\circ}$
每轴最大运动速度	S 轴(回转)	$156(^{\circ})/s$
	L 轴(下臂)	$156(^{\circ})/s$
	U 轴(上臂)	$156(^{\circ})/s$
	R 轴(横摆)	$330(^{\circ})/s$
	B 轴(俯仰)	$330(^{\circ})/s$
	T 轴(回转)	$659(^{\circ})/s$
重复定位精度		$< \pm 0.1\text{mm}$
驱动方式		交流伺服
位置测量		绝对位置码盘
安装方式		直立\侧置\倒装
机器人本体重量		235kg
电源		三相:380V,50Hz

(8) 额定负载 (Rated Load) 工业机器人在限定的操作条件下, 其机械接口处能承受的最大负载 (包括末端操作器), 用质量或力矩表示。

(9) 重复位姿精度 (Pose Repeatability) 在同一条件下, 用同一方法操作时, 重复 n 次所测得的位姿一致程度。

(10) 轨迹重复精度 (Path Repeatability) 工业机器人机械接口中心沿同一轨迹跟随 n 次所测得的轨迹之间的一致程度。

(11) 点位控制 (Point To Point Control) 控制机器人从一个位姿到另一个位姿, 其路径不限。

(12) 连续轨迹控制 (Continuous Path Control) 按编程规定的位姿和速度, 在指定的轨迹上运动。

(13) 存储容量 (Memory Capacity) 计算机存储装置中可存储的位置、顺序、速度等信息的容量, 通常用时间或位置点数来表示。

5.2 机器人的工作原理

5.2.1 机器人工作原理简介

下面以常用的关节坐标型机器人为例, 介绍机器人的工作原理。

图 5-5-4 是一个典型 6 关节工业机器人, 图 5-5-5 是其运动学描述。

从图 5-5-4 中可见, 机器人的机械本体是由数个刚性杆件以旋转关节串联而成。它是一个开环关节链, 一端固定在基座上, 另一端是自由的, 安装着末端操作器 (如焊枪/焊炬或焊钳)。末端操作器的工具中心点 (TCP) 的轨迹是 6 个关节运动所合成的。机器人运动控制的本质就是根据编程指令来指挥 6 个旋转关节协同动作, 以完成工具中心点所要求实现的运动轨迹。由于其 4、5、6 三个关节轴交于一点, 机器人前三个关节 (腰、肩、肘) 的运动主要决定机器人末端的空间位置, 后三个关节 (转腕、摆腕、转手) 的运动主要决定机器人末端的空间姿态。工业机器人采用这种

结构形式能保证在最小几何尺寸条件下达到最大工作空间，能以最优的路径和较高的精度运动到指定的焊接位置。

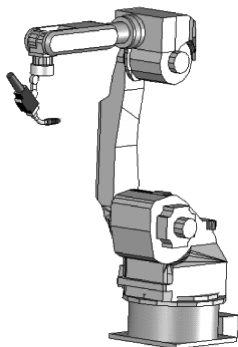


图 5-5-4 典型 6 关节工业机器人

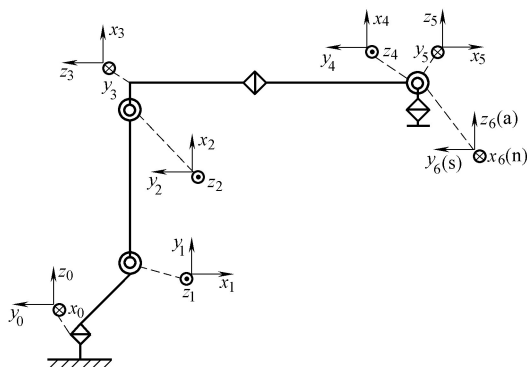


图 5-5-5 工业机器人运动学描述

机器人有两个重要的坐标系，分别为关节坐标系和世界坐标系。

1) 关节坐标系：每个关节的转角用 $\theta_i (i=1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 表示。 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$ 表示机器人的一个运动位置。

2) 世界坐标系：又称基座坐标系，坐标系的原点在基座上。一般地，焊枪的位姿用世界坐标系表示。

机器人运动学包括机器人正运动学和机器人逆运动学。

机器人正运动学是在已知杆件几何结构参数和每个关节的转角条件下，求解末端执行器相对参考坐标系的位置和姿态。这实际上是建立机器人运动学方程问题。在机器人示教过程中，机器人控制器逐点进行正运动学运算。

机器人逆运动学是指已知末端执行器的空间位置和姿态，求解要到达这个位姿机器人各个关节需要转动的角度。这实际上是求解运动学方程的问题。在机器人再现过程中，机器人控制器逐点进行逆运动学运算，将角矢量分解到机械臂各关节上。

由于篇幅的限制，这里不再具体介绍机器人正、逆运动学的数学推导，可以参考相应的机器人书籍。

5.2.2 机器人运动轨迹的实现

机器人的示教再现操作方式，是通过运动命令教机器人如何做，机器人记住后，重复再现这个运动。

一个常规的机器人运动命令包括起点位姿和终点位姿、移动方式（又称为插补方式，包括点对点、直线插补、圆弧插补等）、再现速度。机器人运动轨迹实现过程如图 5-5-6 所示。

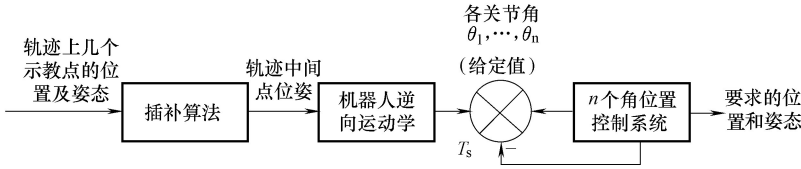


图 5-5-6 机器人运动轨迹的实现过程

以直线运动为例，直线需要示教两个特征点（起点和终点）。由插补算法获得中间点的坐标。再通过机器人逆运动学算法，将轨迹中间点的位姿，转变为对应的关节角 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5,$

θ_0), 然后由 6 个关节的位置伺服控制系统去实现。可见, 机器人的运动是从一点到一点的过程, 机器人实现一个空间轨迹过程, 实际上是轨迹上离散点的实现过程。如果这些离散点间隔过大, 轨迹的误差就大。只有这些离散点间隔很近, 才可能使机器人的实际运动轨迹以较高精度逼近所要求的轨迹。

目前, 绝大部分机器人采用定时插补的方式。插补时间间隔 T_c 的下限值受到计算量的限制, 因为计算机要在 T_c 时间内完成一次插补运算和一次逆运动学运算。插补时间间隔一般为十几毫秒。

具体的直线插补和圆弧插补实现算法可参照机器人专著。

5.2.3 机器人的关节伺服驱动及运动的实现

从机器人的工作原理可见, 机器人的运动精度是由各个关节的角位移精度决定的。每一个关节都是一个独立的位置伺服机构。

焊接机器人多采用交流伺服电动机驱动。机器人关节伺服驱动单元包括交流伺服电动机和交流伺服驱动器, 如图 5-5-7 所示。

机器人关节的位置控制采用三层闭环回路来实现, 如图 5-5-8 所示。最内部是电流环, 电流环外面是速度环, 最外面一层是位置环。

位置和速度反馈传感器是安装在交流伺服电动机轴的非负载端的光电编码器。

闭环控制中的电流环可以控制由于机器人变负载引起的电流突变, 使电枢线圈中的电流在幅值和相位上都得到有效控制, 从而达到保护设备、提高机器人运行稳定性的目的。

速度闭环控制通常采用比例积分控制。它的输出为电流指令 (直流量)。在速度控制形式中, 要求对交流伺服电动机在各种运行状态下的速度加以控制, 以满足负载的工作要求, 保证在定位时不产生振荡, 保证焊接过程中焊接速度的稳定性。

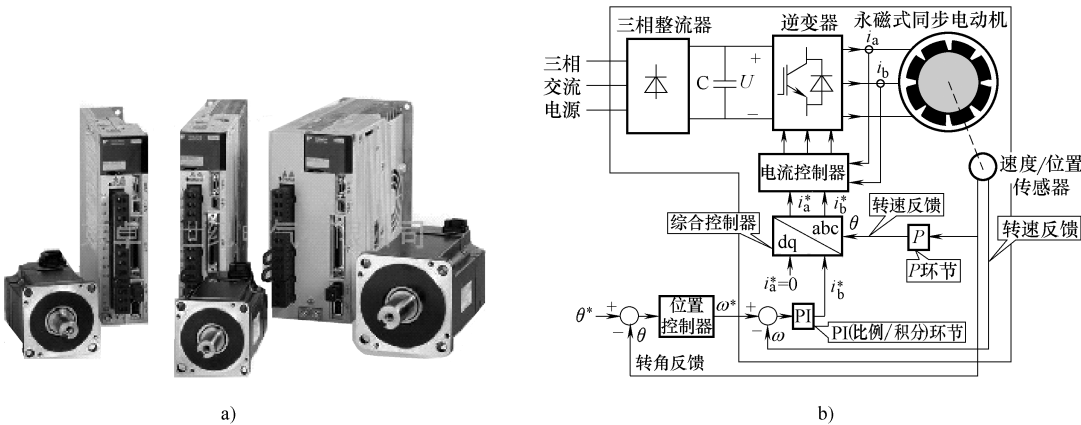


图 5-5-7 交流伺服电动机和交流伺服驱动器
a) 交流伺服电动机和驱动器 b) 驱动器工作原理

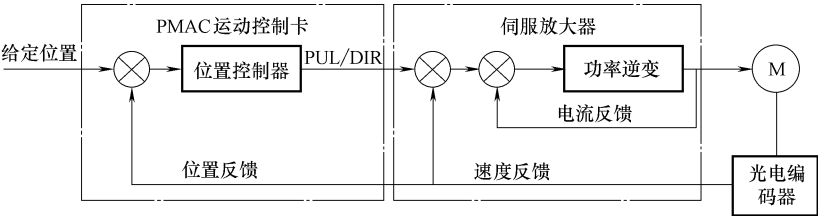


图 5-5-8 位置控制的原理图

位置闭环控制可以保证焊接时的重复位置精度、轨迹重复精度、绝对位置精度和绝对轨迹精度等。当给定运动脉冲数时,交流伺服电动机能以较高的转动精度保证弧焊机器人末端执行器的精确位置(电动机驱动误差小于 1.75%)。

在一个伺服周期(插补时间间隔)内,由插补算法和机器人逆运动学算法计算出关节控制输出角度值,由机器人系统各关节的运动减速比及电动机码盘的分辨率求得对应的控制脉冲数,然后根据伺服周期将控制脉冲数转换为所需的分频系数和计数初值并送入基于PC总线的脉冲发生器,脉冲发生器在伺服周期内向伺服驱动器均匀发出驱动脉冲,实现机器人系统关节运动的平稳控制。

图5-5-9是KUKA机器人公司网站上提供的4、5、6三个关节的驱动机构。

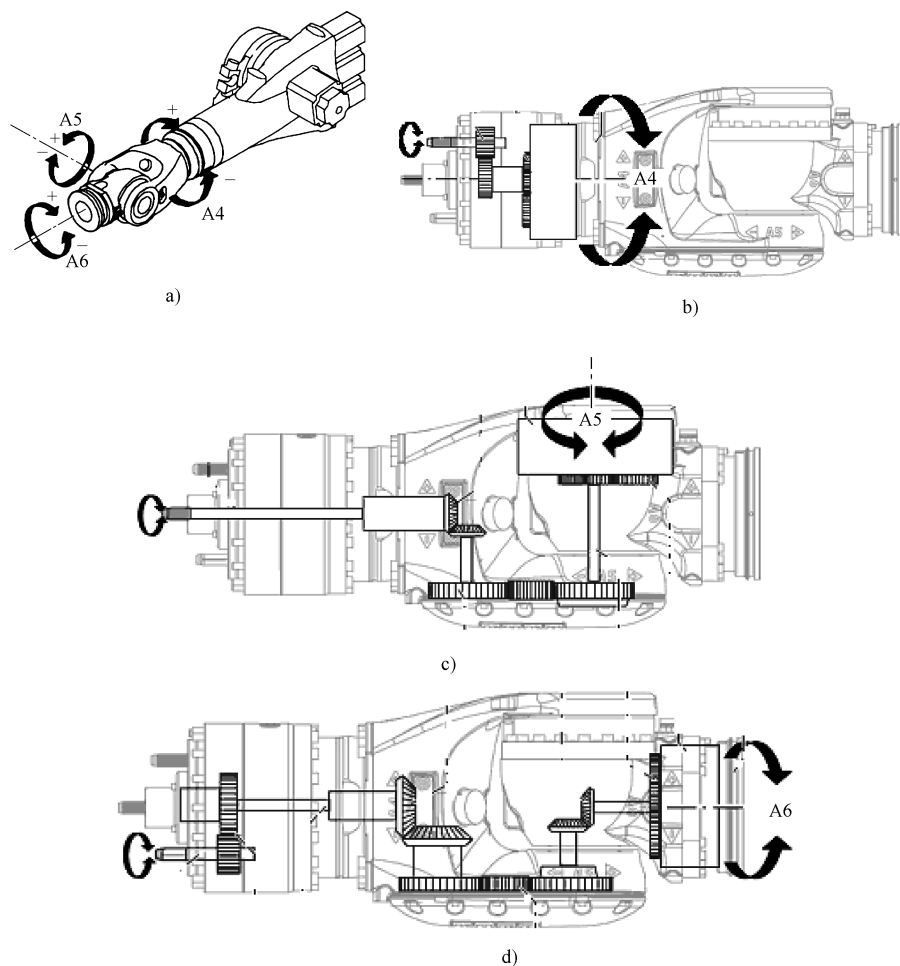


图5-5-9 机器人后三关节运动的实现方式

a) 4、5、6 关节示意图 b) 4 关节运动实现 c) 5 关节运动实现 d) 6 关节运动实现

5.2.4 机器人的控制系统

机器人的控制系统是机器人的核心部件,是机器人的“大脑”,控制系统示意图如图5-5-10所示。一般采用分级控制模式,由主控计算机和多个微处理器分上下两级并行工作,上级主控计算机负责整个系统的管理、传感信息处理及坐标变换和轨迹运算,下级微处理器分管机器人各关节的伺服控制。这样,整个控制系统的工作速度和处理能力都很强。

根据功能和用途的不同,机器人控制系统的软件部分一般包括以下内容:

(1) 伺服控制级软件 用于对机器人关节伺服单元的控制与驱动。主要完成关节控制量向伺服单元驱动脉冲数的转换及伺服电动机码盘反馈量向对应关节值的转换。

(2) 机器人运动控制级软件 用于对机器人进行运动轨迹控制。主要完成机器人系统运动示教, 焊枪运动轨迹的实时插补, 关节空间、世界空间和工具空间运动坐标值的相互转换, 传感信息的处理及关节控制量和臂形的安全检查等。

(3) 周边装置控制级软件 用于控制机器人系统外围设备。主要完成对焊接电源工作状态的设定、弧焊过程传感设备的控制等。

(4) 管理级软件 包括文件操作、与外界的网络通信管理、自我诊断与维护、离线编程等高级功能软件。

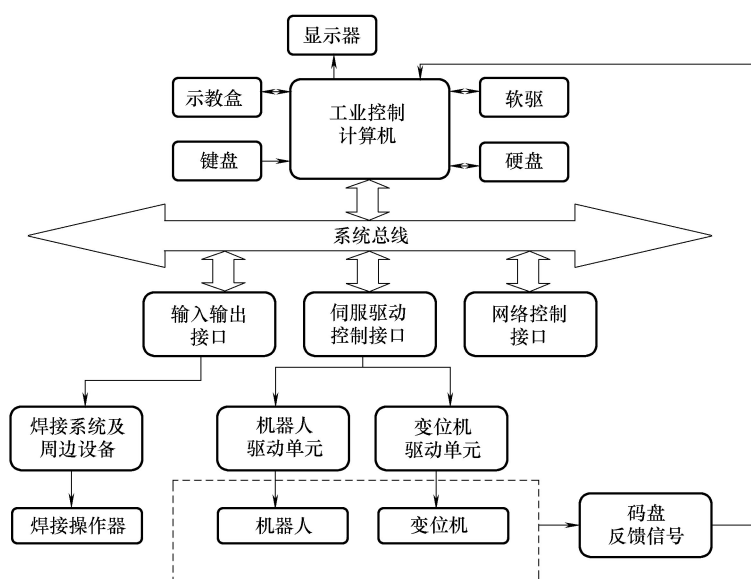


图 5-5-10 机器人的控制系统示意图

5.3 典型焊接机器人系统

5.3.1 基本弧焊机器人系统

一个基本的弧焊机器人系统组成如图 5-5-11 所示, 包括机器人部分 (机器人本体、控制柜、示教盒)、弧焊系统 (弧焊电源、焊炬、送丝机、气瓶、冷却系统等)、工装卡具、辅助设备 (清枪器、自动剪丝机等)、主控制柜。

(1) 用于弧焊的机器人的基本要求和特点 主要有如下方面:

- 1) 弧焊机器人的运动轨迹、焊枪/焊炬姿态、运动速度和稳定性都要求精确控制。
- 2) 一般情况下, 焊接速度为 $1 \sim 50 \text{ mm/s}$, 轨迹精度为 $\pm (0.2 \sim 0.5) \text{ mm}$, 空闲时移动速度为 $1 \sim 3 \text{ m/s}$, 以提高焊接效率。
- 3) 负重较低, 一般为 $6 \sim 16 \text{ kg}$, 主要承受焊枪及其附属装置如传感器、送丝管等的重量。
- 4) 要求具有与弧焊系统的通信功能, 以实现焊接参数和焊接时序的控制。
- 5) 有一定的运动空间要求, 根据焊缝的位置、分布和长度确定机器人的运动空间。

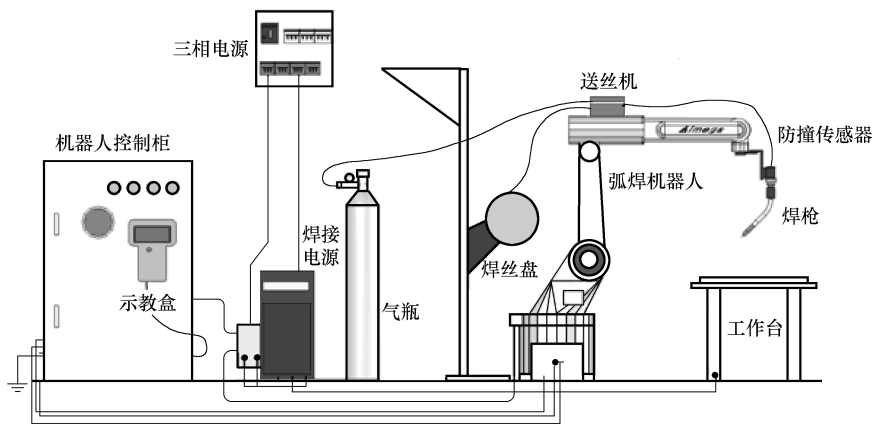


图 5-5-11 基本的弧焊机器人系统组成

- 6) 能够承受电弧、飞溅、烟尘等恶劣环境。
 - 7) 根据弧焊的工艺要求，需要具有摆动、断弧检测、接触寻位、焊缝跟踪、多层多道路径规划等功能。
 - 8) 控制系统要具有可扩充性，以控制周边设备。
 - 9) 具有多种安装方式，如直立式、侧置式、倒装式等。
- (2) 对弧焊系统的要求 主要要求如下：
- 1) 弧焊电源要有外控接口，能与机器人控制柜相连。
 - 2) 一般要求焊接电源有 100% 的负载持续率，长时间使用性能稳定可靠。
 - 3) 尽量采用一体式送丝方式，将送丝机安装在机器人上臂的后部上面，送丝机到焊枪的距离短，送丝阻力小。

5.3.2 基本点焊机器人系统

典型的点焊机器人系统如图 5-5-12 所示。由机器人部分、点焊焊接系统、控制系统组成。

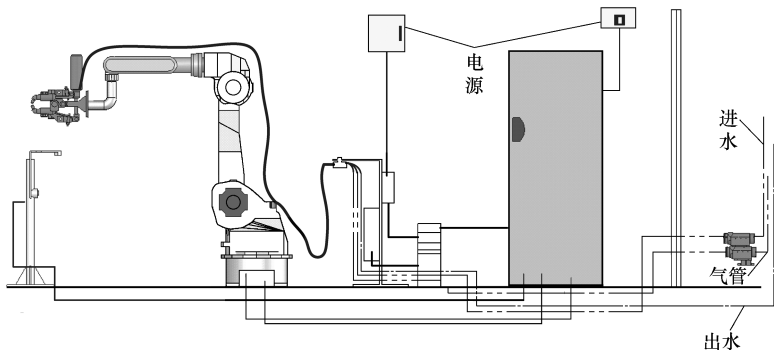


图 5-5-12 典型的点焊机器人系统

5.3.3 焊接机器人系统常用的外围设备

对于复杂工件的焊接，除了要有基本的机器人系统外，还需要相应的外围设备。外围设备与焊接机器人集成为一个能够完成某种焊接任务的系统或称为工作站。

焊接机器人的外围设备包括机器人的底座, 工件的固定工作台, 工件的变位、翻转、移位装置, 机器人的龙门机架、固定机架和移动装置等。工件的固定还需要有胎具、夹具, 此外, 还有焊枪喷嘴清理装置, 焊丝的剪切装置, 焊钳电极的修整、更换装置, 焊枪快速更换装置等辅助设备。这些外围设备如图 5-5-13 所示。

底座和机架的作用是把机器人安装在一个合适的高度上。

机器人或工件的移位装置都是使机器人系统有更多的自由度和更好的可达性, 可以加大机器人的有效工作范围, 并有利于编程。工件变位装置的作用是让被焊的焊缝处于水平或船型位置, 以便获得质量高、外观好的焊缝。变位机是焊接机器人系统的重要组成部分, 种类也比较多, 应根据实际情况选择。

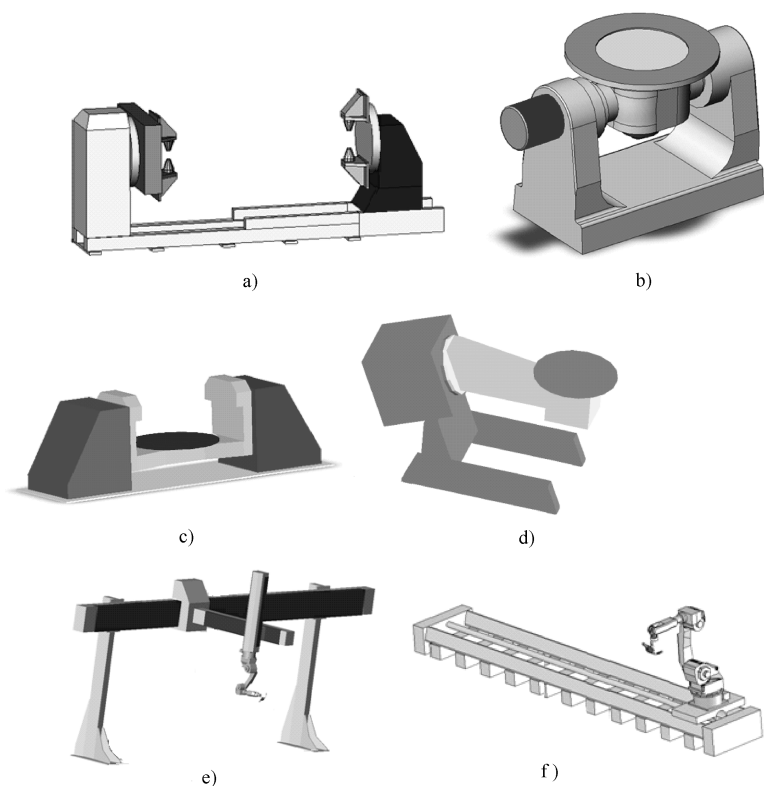


图 5-5-13 焊接机器人的各种外围设备

a) 翻转变位机 b) 旋转/倾斜变位机 c) U 形变位机
d) L 形变位机 e) 三维龙门架 f) 直线导轨

5.3.4 复杂焊接机器人系统

(1) 焊接机器人与周边设备作协调运动的焊接机器人工作站(单元) 变位机与机器人协调运动是指机器人与变位机同时运动, 即变位机一边变位, 机器人一边焊接, 焊缝的轨迹是变位机的运动及机器人的运动复合, 这可使焊枪相对于工件的运动既能满足焊缝轨迹又能满足焊接速度及焊枪/焊炬姿态的要求。协调运动时, 变位机的轴已成为机器人的组成部分, 这种焊接机器人系统可以

多达 7~20 个轴,或更多。焊接机器人与变位机协调运动焊接系统如图 5-5-14 所示。

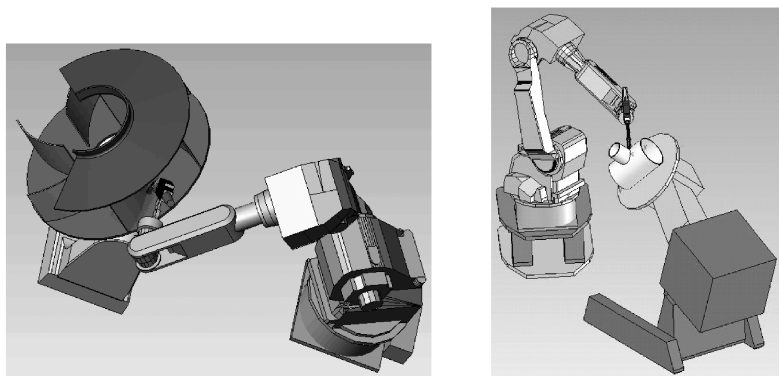


图 5-5-14 焊接机器人与变位机协调运动焊接系统

(2) 多机器人焊接系统 典型的多机器人焊接系统如图 5-5-15 所示。“协调与合作”是多机器人系统需要考虑的问题。

当多机器人系统接受一个任务时,首先应考虑如何组织机器人去完成任务,这时要解决的是多机器人之间怎样进行有效的合作。当经过某种方法确定了各机器人的任务与关系后,应该考虑如何保持机器人之间的运动协调一致性,即多机器人协调。

多机器人协作焊接如图 5-5-15b 所示,一个机器人把持工件,并完成工件的变位,其余机器人进行焊接。这种由机器人来代替变位机的方式大大提高了系统的柔性,同时也极大地减少了工件装卡的时间,提高了系统的工作效率。

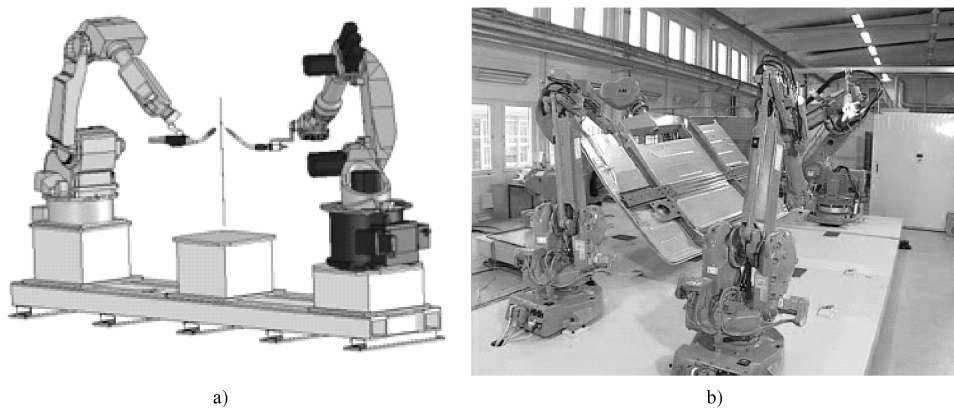


图 5-5-15 多机器人焊接系统

a) 双机器人焊接系统 b) 多机器人焊接系统

(3) 机器人柔性生产线 机器人柔性生产线是在焊接机器人工作站日益成熟的基础上发展起来的,由多台焊接机器人工作站组成的系统,可以方便地实现多种不同类型工件的高效焊接,如图 5-5-16 所示。

焊接柔性生产线一般有一个轨道子母车,子母车可以自动将定位焊后的工件从存放工位取出,送到有空位的焊接机器人工作站的变位机上。也可以从工作站上把焊好的工件取下,送到成品件流出位置。整个机器人柔性生产线由一台计算机调度控制。

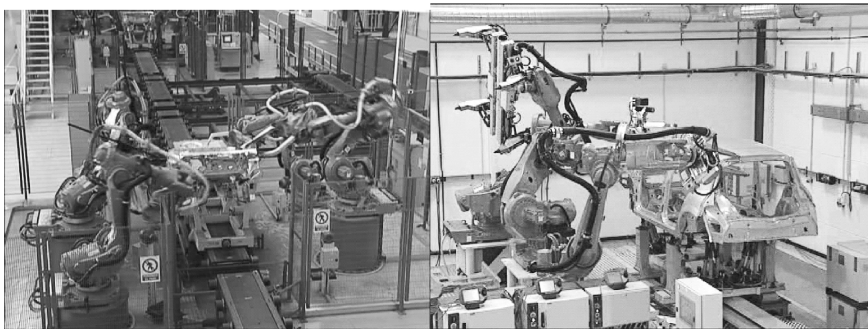


图 5-5-16 机器人柔性生产线

5.4 机器人智能化焊接技术

5.4.1 概述

目前国内外应用的焊接机器人主要采用示教再现方式，示教再现式比较简单、直观、易于操作。但是，示教再现式也有明显缺点，即焊接时缺乏“柔性”。再现时机器人严格执行预先示教的焊接路径和焊接参数，不具备对环境变化的反应能力，这就对焊接作业条件的稳定性提出了严格的要求，从而限制了机器人焊接的使用范围和焊接质量。另外，示教再现方式对复杂形状焊缝的编程效率低，并占用大量生产时间。

为克服各种不确定性因素对焊接质量的影响，需要提高焊接机器人的智能化水平，为其装上“眼睛”和“大脑”，使之具有对外部环境的感知能力，具有一定的判断、行动、记忆、推理和决策的能力，甚至具有任务级的编程能力，能够完成复杂的焊接任务。这就提出了机器人焊接智能化的研究课题。

焊接机器人智能化已经成为研究热点和发展趋势。初级的智能化要求焊接机器人能实现空间焊缝的自动实时跟踪，能实现焊接参数的在线调整和焊接质量的实时控制，其构成如图 5-5-17 所示。更高一级的智能化要求焊接机器人具有焊接任务的自主规划能力、焊接环境的自动识别能力、焊接动态过程的自动传感与智能控制能力等。可见，机器人焊接智能化涉及焊接任务规划、轨迹跟踪控制、信息传感、过程建模、智能控制、多机器人协调、远程通信、人机协作等多方面的内容。

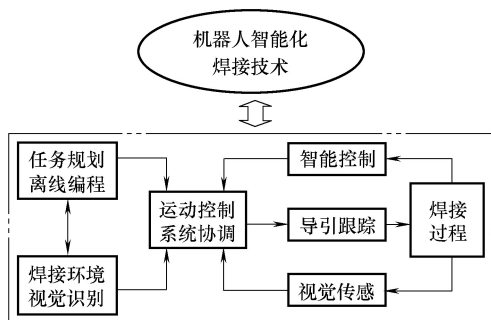


图 5-5-17 焊接机器人智能化技术构成

5.4.2 焊接机器人离线编程与任务规划技术

机器人离线编程（OLP—off-line programming）是机器人编程语言的拓展，它利用计算机图形学的成果，建立起机器人及其工作环境的模型，再利用一些规划算法，通过对图形的控制和操作，在不使用实际机器人的情况下进行轨迹规划，进而产生机器人程序。它是 CAD/CAM/ROBOTICS 一体化的产物。

离线编程技术的最高目标是全自动编程，即只需输入工件的模型，离线编程系统中的专家系统会自动制定相应的工艺过程，并最终生成整个加工过程的机器人程序，称为“傻瓜编程”。目前，

还不能实现全自动编程。自动编程技术的核心是焊接任务、焊接参数、焊接路径和轨迹的规划技术，主要包括以下方面：

- 1) 焊缝信息的自动获取：焊接特征提取和焊接特征建模技术。
- 2) 焊接顺序规划：规划多条焊缝的焊接顺序。
- 3) 焊接参数自动规划：规划焊接过程参数。
- 4) 焊接路径自动规划：规划焊接过程中焊枪位置和姿态。
- 5) 机器人自动放置规划：规划机器人和焊接路径之间的相对放置问题。

图 5-5-18 是一个典型的离线编程系统应具备的基本功能模块，图 5-5-19 是离线编程系统的应用框架，图 5-5-20 是一个离线编程应用实例，图 5-5-21 是任务级离线编程器的结构。

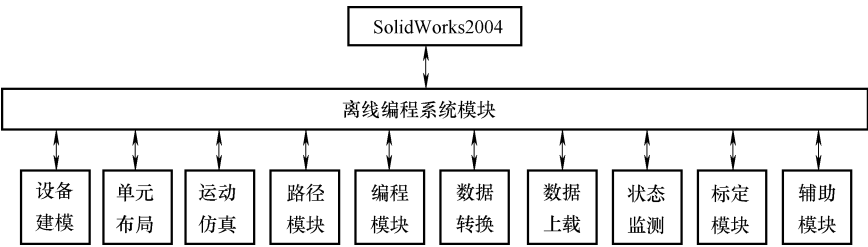


图 5-5-18 离线编程基本功能模块

5.4.3 机器人焊接路径实时跟踪与导引技术

焊接机器人由示教再现型向智能型发展，增强其柔性和适应性，传感器是必不可少的。对于自主焊接来说，传感器感知外部环境的变化通知机器人，机器人实时调整工作状态，以适应环境的变化。这一点对于焊接来说尤为重要。

焊缝跟踪是智能化焊接的基础，在众多的焊缝跟踪传感器中，结构光视觉传感器具有提供信息量丰富，灵敏度和测量精度高，抗电磁场干扰能力强，与工件无接触，适合于各种坡口形状等优点，如图 5-5-22 所示。

结构光跟踪传感器被固定在机器人的焊枪上。传感器采集到坡口上的光纹图像，将模拟视频信号送入图像采集卡，图像采集卡将视频信号转换成数字图像送入控制计算机，经过图像处理程序提取坡口的特征点坐标，用标定得到的换算关系把特征点图像坐标转化为焊枪工具坐标系下的坐标，然后将得到的坐标值数据传送到机器人控制器，计算出特征点的世界坐标。

当采用传感器引导机器人运动的方式时，因为传感器投射的结构光纹在焊枪之前有一定距离（称为前视距离），所以提取的特征点信息在跟踪过程中不是立刻被使用的，而要等到焊枪到达该点附近时才能用到。因此需要把采集到的跟踪点信息存储起来，在需要的时候提供使用。

设前视距离为 $\Delta L = 30\text{mm}$ ，图像处理时间为 $\Delta T = 90\text{ms}$ ，所用机器人伺服周期为 $\Delta t = 15\text{ms}$ 。如果焊接速度为 $v = 5\text{mm/s}$ ，那么测量点时间间隔为 6 个伺服周期，即 0.45mm 。在前视距离长度内，可以采集 66 个焊缝特征点。

采用直线拟合来处理局部数据，以消除干扰。图 5-5-23 示出了每个测量点理想的焊枪位姿的计算方法。图中焊缝上点 c 的坐标是由图像处理和坐标变化得到的。理想的焊枪指向，即 Z_s 方向，

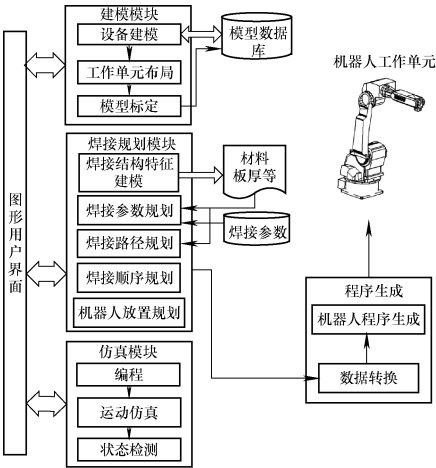


图 5-5-19 离线编程系统的应用框架

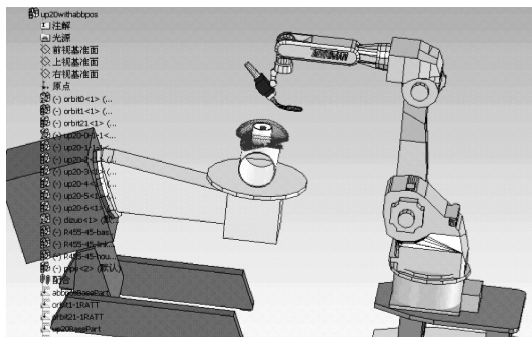


图 5-5-20 离线编程应用实例

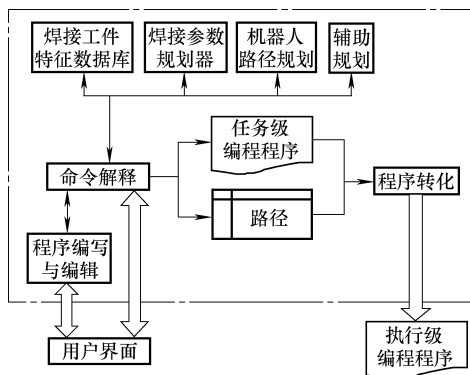


图 5-5-21 任务级离线编程器的结构

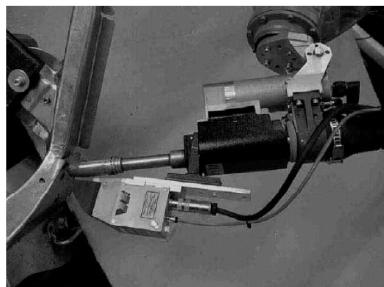
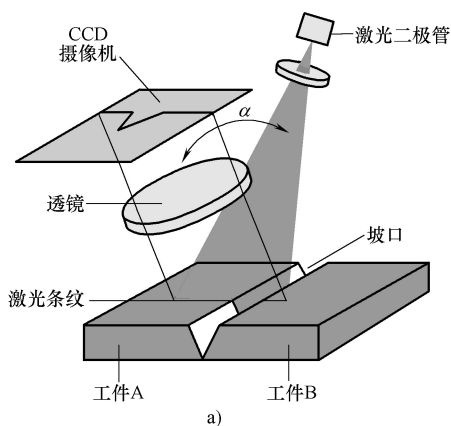


图 5-5-22 结构光焊缝跟踪

a) 工作原理 b) 实际应用

应垂直于焊件表面，是表面的法线方向。多个测量点拟合的直线 L_1L_2 代表着焊接方向，光纹 ae 位于焊件表面平面内，其方向也是已知的。由 L_1L_2 和 ae 就可计算出 Z_s 方向。这样，测量点 c 的位姿就都得到了。

下面简单介绍跟踪的实现方法。

设当前及下一个机器人伺服周期焊枪应到达的位姿矩阵分别表示为 $T_i(i)$ 和 $T_i(i+1)$ ，则有

$$T_i(i+1) = T_i(i) \times \Delta T \quad (5-5-1)$$

$$\Delta T = T_i^{-1}(i) \times T_i(i+1) \quad (5-5-2)$$

矩阵 $T_i(i+1)$ 是由矩阵 $T_i(i)$ 通过旋转平移得到的，所以有

$$\Delta T = \text{Trans}(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \times \text{Rot}(x, \partial x) \times \text{Rot}(y, \partial y) \times \text{Rot}(z, \partial z)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \partial y \cos \partial z & \cos \partial z \sin \partial y \sin \partial x - \sin \partial z \cos \partial x & \cos \partial z \sin \partial y \cos \partial x + \sin \partial z \sin \partial x & \Delta x \\ \cos \partial y \sin \partial z & \sin \partial z \sin \partial y \sin \partial x + \cos \partial z \cos \partial x & \sin \partial z \sin \partial y \cos \partial x - \cos \partial z \sin \partial x & \Delta y \\ -\sin \partial y & \cos \partial y \sin \partial x & \cos \partial x \cos \partial y & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-5-3)$$

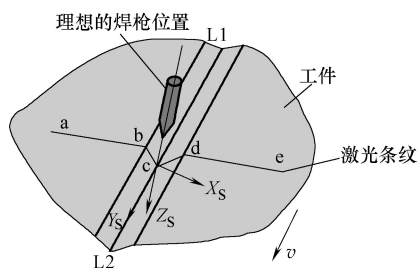


图 5-5-23 测量点理想焊枪位姿计算示意图

由于 ∂i 很小,有 $\sin(\partial i) \approx \partial i$, $\cos(\partial i) \approx 1$ 。式(5-5-3)变为

$$\Delta T = \begin{bmatrix} 1 & -\partial z & \partial y & \Delta x \\ \partial z & 1 & -\partial x & \Delta y \\ -\partial y & \partial x & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-5-4)$$

对比式(5-5-2)和式(5-5-4)就可以得到驱动向量 D_i , $D_i = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \partial x, \partial y, \partial z]^T$ 。机器人的驱动向量使焊枪向焊缝的中心点方向调整,并按照给定的步长运动,使其始终沿焊缝方向向前运动,实现沿焊缝的自主跟踪。

为保证焊接过程的平稳性,沿着焊接方向每次的调整是固定的,即

$$\Delta y = V\Delta t \quad (5-5-5)$$

驱动向量的6个分量每次并不是都要调整,这要根据具体情况而定。如跟踪直线焊缝,则只需要调整水平偏差 Δx 和高度偏差 Δy ;对于大曲率的曲线焊缝,则有时需要增加焊枪的自转调整,即绕 z 轴旋转,这是由于传感器与焊枪之间有一定的前视距离,而且传感器的视野有限。因此在跟踪过程中,若焊缝轨迹曲率过大,焊缝就会超出传感器的视野范围。因此必须控制焊枪带动传感器绕 z 轴旋转,以控制焊缝始终处在传感器视野范围之内。另外,应尽量控制焊缝的特征点处在结构光线正中,因为这时在跟踪中产生的误差最小。

5.4.4 人-机器人协作控制技术

人-机器人协作控制技术是近年来提出的,是为解决焊接复杂性和目前机器人自主焊接能力局限性的矛盾,其缘由和研究目的如下:

第一,焊接的复杂性体现在焊接结构的多样性(大、小、厚、薄)、接头形式的多样性(对接、角接、搭接等)、焊缝位置的多样性、坡口准备质量的随机性、各种干扰的存在(弧光、定位焊、变散热、变错边、变间隙等)等。焊接的复杂性决定了自动化焊接的高难度,每一个产品对自动化焊接的要求都不同。

第二,作为自动化焊接水平最高的代表——焊接机器人近年来虽然取得了很大的进步,但是它的能力仍然非常有限。焊接机器人除了高超的执行能力外,它的感知能力、适应能力和智能决策能力仍然很低,这导致了焊接机器人只能应用于简单产品的自动化焊接。

第三,追求“机器人全自主焊接”一直是人类的梦想,但是研究和生产实践证明,当前实现全自主焊接还是不可能的。“智能代价说”表明,智能系统的智能越高,系统开发代价(费用和时间)就越大,可靠性越低。

第四,人机协作是解决复杂产品高质量焊接的一种有效的解决方案。机器人具有良好的执行能力,而人具有优越的适应能力和高智能分析决策能力,人与机器结合,合理分工,相互配合,将大大提高整个焊接系统的适应能力和智能水平。

正是基于以上考虑,提出了人-机器人协作焊接的思想,通过研究人机协作智能控制理论和方法,揭示人机协作智能控制的规律,建立人机一体化系统,实现人与智能机器人在感知与执行层面,特别是智能决策层面的结合,发挥人与智能机器人在感知、决策与执行层面的各自优势,从而增强整个焊接系统的适应性和鲁棒性,以扩大自动焊接的应用范围,完成复杂产品的焊接。图5-5-24是人-机器人协作控制系统的示意图。

人-机器人协作的主要研究内容如下:

1) 增加机器人的感知能力,增强其对人的友好性和可操作性。

2) 焊接中人与智能机器人在感知、决策和执行层面的分工原则,包括焊接中人的优势与劣势;焊接中智能机器人的优势与劣势;焊接中人与智能机器人的分工原则。

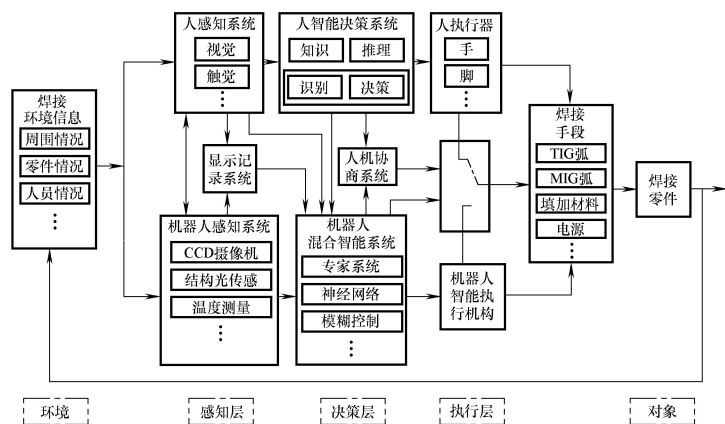


图 5-5-24 人-机器人协作控制系统

- 3) 人机智能系统界面研究，包括人与机器的界面和人机智能系统与环境的界面、反应人机耦合技术的信息交流的界面。
- 4) 研究焊接人机一体化智能控制的结构模型。
- 5) 研究焊接人机一体化智能控制策略，包括“人主机辅”控制策略、“机主人辅”控制策略、“人机协同”控制策略。

5.4.5 多焊接机器人协调控制技术

多机器人焊接如图 5-5-25 所示，目前是一个研究热点问题。

多机器人系统是指若干个机器人通过合作与协调而完成某一任务的系统。它包含两方面的内容，即多机器人合作与多机器人协调。当给定多机器人系统某项任务时，首先面临的问题是如何组织多个机器人去完成任务，如何将总体任务分配给各个成员机器人，即机器人之间怎样进行有效地合作。当以某种机制确定了各自的任務与关系后，问题变为如何保持机器人间的运动协调一致，即多机器人协调。对于由紧耦合子任务组成的复杂任务而言，协调问题尤其突出。

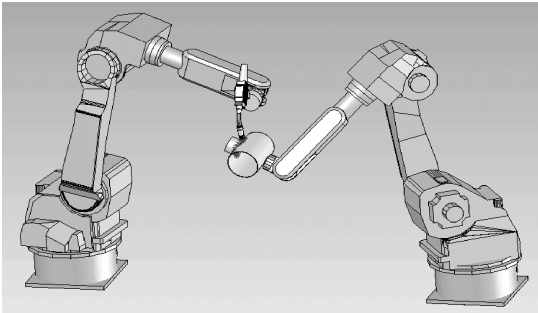


图 5-5-25 多机器人焊接

智能体技术是解决这一问题的最有力的工具。多智能体系统（Multi-Agent System，MAS）研究在一定的网络环境中，各个分散的、相对独立的智能子系统之间通过合作，共同完成一个或多个控制作业任务的技术。多智能体系统成为一种对复杂系统进行分析、设计的有力思想方法和工具。每个机器人都被视为一个具有智能行为的 Agent，每个 Agent 只处理与自身相关的局部目标和局部信息，具有自主能力，同时又具有合作的能力，即社会行为能力。一个通过以太网连接的多机器人系统如图 5-5-26 所示。

5.4.6 遥控机器人焊接

遥控焊接是指人在离开现场的安全环境中对焊接设备和焊接过程进行远程监视和控制，进而完成全部焊接工作。在核电站设备维修、海洋工程建设以及未来的空间站建设中都要用到焊接。这些

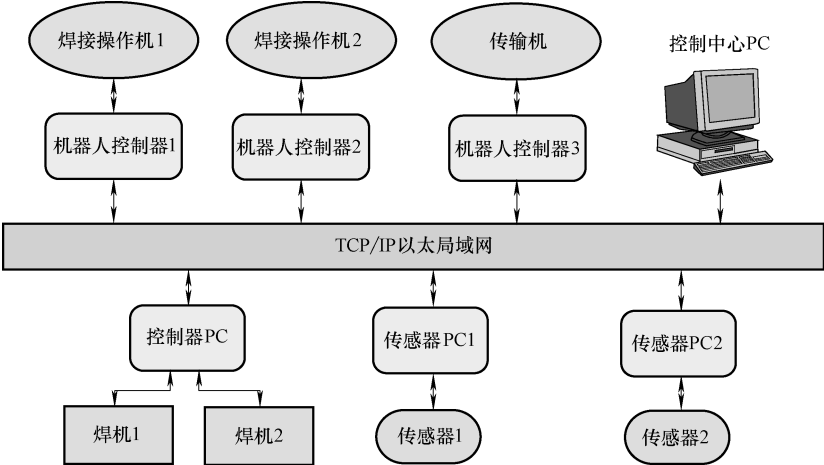


图 5-5-26 多机器人系统的硬件网络结构

环境中的焊接工作不适合人类亲临现场，而目前技术水平还不可能实现完全的自主焊接，因此需要采用遥控焊接技术。遥控焊接可以发挥和利用人的高智能与机器人高超的执行能力，灵活性强。

遥控焊接提出有 30 余年的历史，目前美国、欧洲、日本等国对遥控焊接进行了深入的研究，图 5-5-27 是英国通用机器人公司 1999 年研制成功的 ARM 水下机器人系统，用于清理和监视水下复杂结构焊缝，进行焊接修复操作。该遥控机器人具有 6 自由度的机械臂与可调姿态和焦距的摄像机装在远程操作载体上，其焊接系统设计了直接手动控制、增强手动控制、半自主控制及全自主控制 4 种工作模式，成功地进行水下焊缝检测、焊接及打磨工作。

遥控焊接存在以下难点：

- 1) 控制参数多，有跟踪位置、弧长、速度、姿态等。
- 2) 参数的控制精度要求高，对焊枪位置和速度的控制尤其重要。
- 3) 控制的实时性要求高。
- 4) 焊枪和工件表面没有接触，焊接过程不能采用力觉传感。
- 5) 信息反馈依赖视觉，而弧光影响视觉反馈效果。
- 6) 需要适合焊接特点的操作器控制方法。

遥控焊接涉及的关键技术如图 5-5-28 所示。

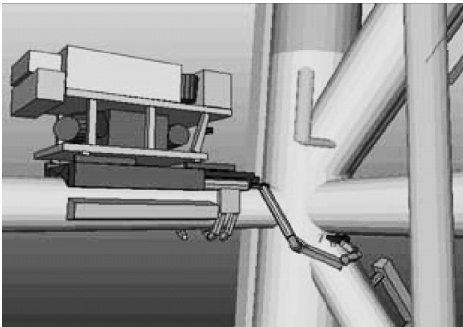


图 5-5-27 遥控焊接水下机器人系统

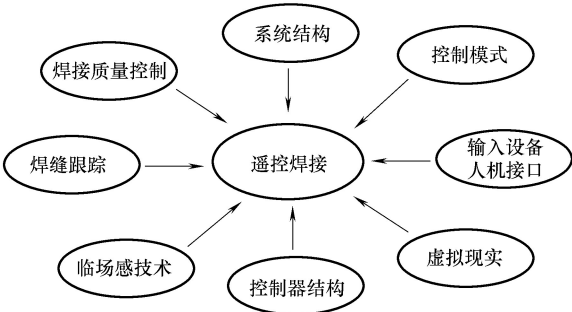


图 5-5-28 遥控焊接涉及的关键技术

遥控焊接的运动控制模式的发展集中在自主系统、操作者和机器人之间合理分配机器人的控制权上。遥控焊接中人的智能参与程度与机器人自主级别之间的关系如图 5-5-29 所示，随着操作者智能参与的增加，系统自主级别降低。根据操作者在系统中的作用将遥控焊接机器人的运动控制模

式分为直接控制、监督控制、共享控制、合作控制、自主控制。

在遥控焊接任务执行过程中，在不同的阶段需要在操作者和智能系统之间采用不同的智能控制方式。在任务下达、任务分解、任务规划过程中以操作者为主，通过操作者与人机接口的交互完成。任务执行过程中，以机器人和传感子系统为主，通过自动控制、自主控制和共享控制完成，操作者进行宏观监控。整个任务的完成过程中，操作者手动控制命令始终保持在系统中，随时调整焊接参数和焊枪位置、姿态，对意外事件的处理和系统恢复由机器人和操作者之间协作完成。

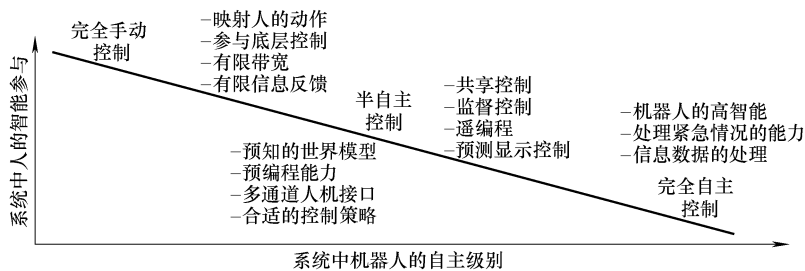


图 5-5-29 人的智能参与和机器人的自主级别之间的关系

图 5-5-30 是哈尔滨工业大学开发的多控制模式遥控焊接机器人系统。操作者和 6 自由度弧焊机器人位于遥操作系统两端，系统包括遥操作子系统、激光视觉传感系统、虚拟环境规划与控制系统、视觉临场感系统、弧焊机器人子系统、网络通信子系统和焊接附属设备。各个模块相互独立，能够完成一部分子任务，通过相互组合协作，完成整个遥控焊接过程。该机器人具有 5 种作业模式：直接控制、遥控示教、共享控制、基于虚拟环境的监督控制和自主控制。

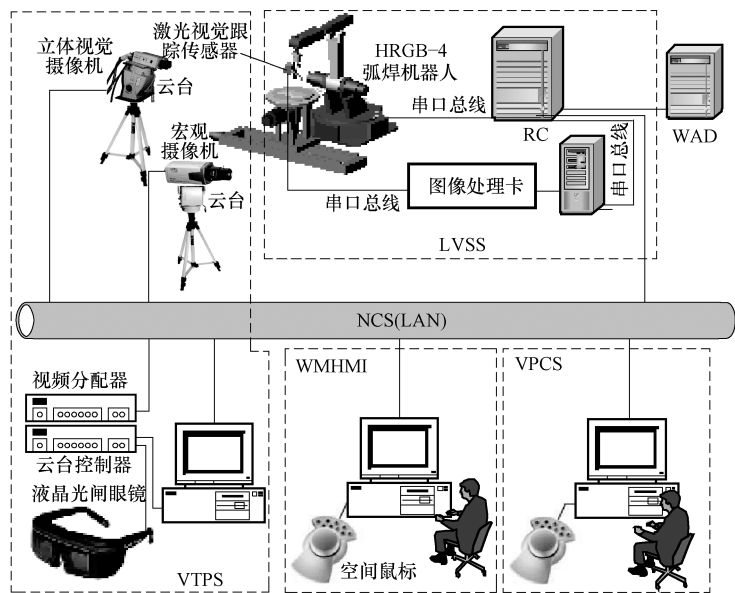


图 5-5-30 多控制模式的遥控焊接机器人系统

研究人员提出“宏观遥控，局部自主”的控制思想来实现遥控焊接。将远端焊接机器人与焊枪/焊炬的运动空间划分为 3 个区域：自由运动区、受限运动区、焊接区，如图 5-5-31 所示，在自由运动区时，焊接机器人由操纵杆或者空间鼠标引导，向焊接目标作高速运动，此时通过视觉信息反馈进行避障，焊枪姿态变化小，系统平稳；当到达受限运动区时，由于焊缝周围的障碍物存在，

需要减慢机器人的运动速度,向焊缝空间上方移动,此时通过视觉反馈信息寻找焊缝的起始点,判断障碍物类型和焊缝类型;当到达焊接区时,即焊缝起始点正上方的50mm左右处,以较小的运动速度平稳进入焊接区。即在自由运动区采用高速宏观导引,受限运动区采用低速导引定位,焊接区采用自主跟踪控制、自动控制或者共享控制等控制模式控制机器人及焊枪的运动。

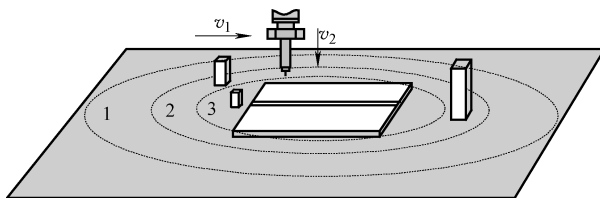


图 5-5-31 远端焊枪的运动空间划分

1—自由运动区 2—受限运动区 3—焊接区

参 考 文 献

- [1] 吴林. 焊接自动化的新方向——焊接机器人 [J]. 焊接, 1985, (10): 1-3
- [2] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册: 第1卷, 焊接方法及设备 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [3] 林尚扬, 陈善本, 李成桐. 焊接机器人及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] 梁琪. 全球机器人市场统计数据分析 [J]. 机器人技术与应用, 2010, (2): 26-31.
- [5] 李海超. 焊接遥操作机器人系统及人机协作控制策略的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [6] 陈善本, 林涛, 等. 智能化焊接机器人技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

传承焊接基础的经典著作
典藏焊接图书的必备书目

焊接科学基础

◆ 材料焊接科学基础 ◆

◆ 焊接方法与过程控制基础 ◆

◆ 焊接力学与焊接结构基础 ◆

地址:北京市百万庄大街22号
邮政编码:100037

电话服务

社服务中心:010-88361066

销售一部:010-68326294

销售二部:010-88379649

读者购书热线:010-88379203

网络服务

教材网: <http://www.cmpedu.com>

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

上架指导 工业技术/机械工程/焊接工艺

ISBN 978-7-111-46212-5

策划编辑◎何月秋 / 封面设计◎马精明

ISBN 978-7-111-46212-5



9 787111 462125 >

定价: 178.00元